

Capítulo 15

Acondicionamiento del combustible bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) por medio de la pirólisis para la reducción de emisiones atmosféricas en Sandoná - Nariño

Carol Julieth Montezuma Guerrero¹

Jefferson Giovanny Nasner Tello²

Milton Camilo España Benavides³

Juan Carlos Narváez Burgos⁴

Cítese como: Montezuma-Guerrero, C. J., Nasner-Tello, J. G., España-Benavides, M. C. y Narváez-Burgos, J. C. (2023). Acondicionamiento del combustible bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) por medio de la pirólisis para la reducción de emisiones atmosféricas en Sandoná - Nariño. En F. C. Gómez-Meneses, L. M. Gómez y J. P. García-López (comps.), *Formación de competencias científicas desde la investigación y la academia* (pp. 164-180). Editorial UNIMAR. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.207.c345>

Resumen

En el municipio de Sandoná, el bagazo de caña de azúcar es usado como combustible en las industrias paneleras, generando emisiones de gases contaminantes. Es por eso que esta investigación centra su objetivo en acondicionar esta biomasa por pirólisis, con el propósito de reducir las emisiones que este proceso conlleva. Para lograr estos objetivos se plantea caracterizar el bagazo mediante sus propiedades fisicoquímicas y comparar las emisiones de un bagazo crudo y un bagazo acondicionado. La línea y campo de investigación es ambiental, debido a su desarrollo en el campo para controlar la contaminación y el aporte de estrategias de producción más limpia, que permitan la disminución de emisiones y, por ende, la mejora de calidad del aire. El trabajo de investigación tiene un enfoque mixto; es decir cuanti-cualitativo, donde se emplea un tipo de investigación analítico-experimental, manejando un diseño compuesto por dos experimentos, del tipo unifactorial y de efectos fijos principales.

Al realizar los procesos de combustión de bagazo crudo se identificó que las variables de combustión presentan una tendencia ascendente en los contaminantes, de

¹ Correo: caromontezuma@umariana.edu.co

² Correo: jnasner@umariana.edu.co

³ Correo: miespana@umariana.edu.co

⁴ Correo: jcnarvaez@umariana.edu.co



acuerdo con la eficiencia de combustión, ya que cuando esta disminuye, los gases aumentan buscando una estabilidad dentro del proceso.

Palabras clave: pirólisis; emisiones; bagazo; combustión.

Conditioning of sugar cane bagasse fuel (*Saccharum officinarum*) by pyrolysis to reduce atmospheric emissions in Sandoná – Nariño

Abstract

Sugarcane bagasse in the municipality of Sandoná, department of Nariño, Colombia, is used as fuel in the sugarcane industry, generating pollutant gas emissions. This research focuses its objective on conditioning this biomass by pyrolysis, to reduce the emissions that this process entails. To achieve this, it is proposed to characterize the bagasse using its physicochemical properties and compare the emissions of raw bagasse and conditioned bagasse. The line and field of research is environmental, due to its development in the field to control pollution and the contribution of cleaner production strategies that allow the reduction of emissions and, therefore, the improvement of air quality. The research work has a quantitative-qualitative approach, using an analytical-experimental type of research, managing a design composed of two single-factorial and fixed main effects experiments.

When the raw bagasse combustion processes were carried out, it was identified that the combustion variables show an upward trend in pollutants, according to the combustion efficiency, since when this decreases, the gases increase, seeking stability within the process.

Keywords: pyrolysis; emissions; bagasse; combustion.

Condicionamento do combustível de bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) por pirólise para reduzir as emissões atmosféricas em Sandoná - Nariño

Resumo

O bagaço de cana-de-açúcar no município de Sandoná, departamento de Nariño, Colômbia, é usado como combustível na indústria da cana-de-açúcar, gerando emissões de gases poluentes. Esta pesquisa concentra seu objetivo no condicionamento dessa biomassa por pirólise, para reduzir as emissões que esse processo acarreta. Para isso, propõe-se a caracterização do bagaço por meio de suas propriedades físico-químicas e a comparação das emissões do bagaço bruto e do bagaço condicionado. A linha e o campo de pesquisa são ambientais, devido ao seu desenvolvimento no campo de controle da poluição e à contribuição de estratégias de produção mais limpas que permitem a redução das emissões e, portanto, a melhoria da qualidade do ar. O trabalho de pesquisa tem uma abordagem quantitativa-qualitativa, utilizando um tipo de pesquisa analítico-experimental, gerenciando um projeto composto por dois experimentos de fator único e efeitos principais fixos.



Quando foram realizados os processos de combustão do bagaço bruto, identificou-se que as variáveis de combustão apresentam uma tendência de aumento de poluentes, de acordo com a eficiência da combustão, pois quando esta diminui, os gases aumentam, buscando estabilidade no processo.

Palavras-chave: pirólise; emissões; bagaço; combustão.

Introducción

Según Hernández-Garcés et al. (2017), “la quema indiscriminada de hidrocarburos para la producción de energía y las subsiguientes emisiones a la atmósfera [han] provocado uno de los problemas más importantes desde que se mostraron sus efectos: la contaminación atmosférica” (p. 2). En el municipio de Sandoná, las industrias paneleras, coloquialmente conocidas como trapiches, usan el bagazo (subproducto del proceso de elaboración de panela) para la combustión en los hornos artesanales, con el propósito de cocinar el jugo de caña. En estos lugares de producción no existe un control de emisiones generadas por la combustión de esta biomasa, por lo cual estos autores sostienen que “este riesgo siempre está presente y depende, entre otros factores, del estado técnico de las calderas, de la existencia de sistemas de tratamiento y de la composición del combustible” (p. 3).

Durante el proceso de elaboración de la panela, hay inconsistencias al momento de utilizar algunos subproductos, como es el caso del bagazo de la caña, ya que no se conoce un procedimiento diferente que cumpla con la misma función y que, al mismo tiempo, sea menos contaminante.

La producción de panela se encuentra consolidada como la segunda agroindustria rural de Colombia y una de las más importantes, superada únicamente por el café, por lo cual la panela refleja la identidad cultural del país (Ley 2005 de 2019). La presente investigación surge frente a la situación observada en diferentes industrias paneleras en la zona de Sandoná, municipio conocido a nivel nacional e internacional por sus grandes terrenos sembrados de caña de azúcar y, por consiguiente, de la producción y buena calidad de panela, a partir de esta materia prima. Allí, la producción panelera representa, además de un factor de ingreso económico, un gran sentido cultural para el municipio, conocido como la ‘Ciudad dulce de Colombia’. El proceso de producción genera emisiones contaminantes al ambiente, debido a la combustión de residuos, principalmente de bagazo, usado como combustible para el calentamiento de grandes pailas en donde se cocina el producto (Hernández-Garcés et al., 2017).

Para Colombia, es importante conocer la guía ambiental para el subsector panelero y el régimen permitido para la siembra, cosecha y elaboración de este producto (Fonseca, 2002), por lo cual el proceso productivo se relaciona con la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en la que se adopta la norma de calidad de aire y se dicta otras disposiciones referentes a los contaminantes atmosféricos y su fuente de emisión, con el propósito de hacer cumplir las actividades ordenada y racionalmente, disminuyendo el impacto ambiental y mejorando continuamente la emisión de gases nocivos.



Descripción y planteamiento del problema

El proceso de producción inicia con la siembra; continúa con el proceso de corte, carga, almacenamiento y transporte hacia el trapiche, donde se realiza el proceso de la molienda, con el fin de extraer el jugo de la caña a través de un molino.

La molienda de caña se hace en molinos de fabricación nacional, con muy bajas relaciones de extracción: entre el 30 y el 50 % (Murillo, 2020, como se cita en Aldana et al., 2020), dejando como subproductos el jugo de caña y el bagazo, que hacen referencia a la caña seca. Este bagazo es llevado a la zona bagacera, donde lo almacenan, en su mayoría, en forma desorganizada; posteriormente, se somete este bagazo a una deshidratación y secado para luego usarlo como combustible para los hornos y calderas.

El jugo de caña es sometido a una limpieza por medios físicos donde son eliminados algunos sólidos suspendidos e impurezas; cuando está prelimpio, pasa a un proceso de ‘clarificación’ en las primeras pailas, las cuales son calentadas utilizando como combustible el bagazo forjado en la molienda. En este proceso se genera una espuma conocida como ‘melaza’ que luego es procesada y usada como alimento para los equinos. Posteriormente, se da el proceso de evaporación, donde se alcanza grandes temperaturas en las pailas y se presenta un cambio de estado del agua, de líquido a vapor, logrando aumentar el contenido inicial de los sólidos solubles hasta llegar al punto de la panela o miel (Murillo, como se cita en Aldana et al., 2020). Se continúa con la combustión del bagazo hasta que se consume para el siguiente proceso. En seguida se realiza el ‘batido’, que se agita en grandes pailas para conseguir una consistencia espesa y eliminar la adherencia. Enseguida, se realiza un moldeo, si la panela quiere ser obtenida en bloque; o, tamizado, si se la quiere obtener granulada. Cuando ya está moldeada, se da el proceso de ‘enfriamiento’ para que la mezcla obtenga un estado máximo de compactación sólida. Finalmente, se hace el empaque, según la presentación que se requiera, principalmente en bolsas plásticas que son selladas por medio de una templadora.

Formulación del problema

¿Existe una reducción significativa en las emisiones de gases de combustión al utilizar bagazo acondicionado por pirólisis y bagazo crudo?

Justificación

La presente investigación permitirá que los índices de contaminación sean ajustados a la normatividad colombiana; así mismo, contribuirá a la disminución de polución del municipio y, por ende, a la protección y control de calidad de aire inscritas en el Decreto 2107 de 1995. Además, su importancia radica en que permitirá un control de emisiones en este tipo de procesos productivos que han prevalecido a través del tiempo, como una cultura para el municipio, beneficiando al control de contaminación atmosférica para el municipio y disminuyendo las imperfecciones generadas a nivel paisajístico, debido a la polución.



Del mismo modo, motiva a la alcaldía municipal y al gremio panelero en la aplicación de procesos regidos por producción más limpia, buscando garantizar el desarrollo sostenible, tomando a la gestión ambiental como una fuente de oportunidades en el ámbito empresarial (Oficina Internacional del Trabajo, OIT, 2013). Implementar una producción más limpia significa aumentar la eficiencia de procesos, ahorrar en el consumo de materias primas y energía, disminuir residuos y emisiones contaminantes.

Es de resaltar que en el municipio de Sandoná cada día surgen más industrias paneleras; sin embargo, no hay estudios a profundidad que muestren el impacto real producido después de la quema del bagazo y con el cual se pueda tomar decisiones favorables al respecto, realizando una comparación analítica de las emisiones conocidas a partir de la literatura y las que son producidas por medio del bagazo previamente acondicionado. Por medio de este trabajo pueden surgir aportes y establecer procesos distintos, que cumplan la misma función pero que generen menores contaminantes.

Objetivos

General: Evaluar el nivel de variación que se presenta en la emisión de gases, al acondicionar por pirólisis el bagazo de caña utilizado en la producción de panela.

Específicos

- Caracterizar el bagazo de caña sin tratamiento generado, a partir de la extracción artesanal de jugo de caña.
- Implementar un proceso de pirólisis en el laboratorio, que permita el acondicionamiento del bagazo de caña.
- Cuantificar las emisiones generadas por el bagazo de caña antes y después del tratamiento.

Marco referencial o fundamentos teóricos

Antecedentes

A continuación, se presenta una recopilación de investigadores nacionales e internacionales en el tema del proceso de pirólisis del bagazo de caña de azúcar y sus principales y determinantes emisiones hacia la atmósfera.

Internacionales

Labrada (2009) propone desarrollar un proceso de pirólisis que sustituya a la combustión común del bagazo, por medio de un horno discontinuo, indicando lo que se obtiene a partir del mismo; establece que la biomasa a tratar, el bagazo de caña, presenta una composición física que varía entre límites estrechos, siendo la humedad la propiedad más representativa en cuanto a sus cualidades como combustible, estando entre un 42 y un 50 % aproximadamente. El bagazo se compone de fibra y azúcares e impurezas; considera esencial el análisis de la temperatura de la cámara de calentamiento, de la muestra de bagazo para



pirolizar, de vapores, el volumen de vapores condensados e incondensables y el pH de vapores condensados.

Como aporte a la presente investigación, Labrada (2009) da a conocer los porcentajes calculados con los vapores promedios obtenidos en cuanto a la composición de la biomasa, estableciendo el carbón vegetal 18-22 %, fracción condensable 45-52 %, fracción no condensable 30-33 %; de esto se resalta el potencial de carbón vegetal que presenta esta biomasa, de donde surge su gran aplicabilidad en procesos de combustión, como el caso de la producción de panela.

Igualmente, Labrada (2009) indica que el proceso de pirólisis efectuado se consideró al inicio como endotérmico y después, cambió a exotérmico. Se obtuvo que el tiempo es proporcional a la temperatura del bagazo; la temperatura de vapores experimenta un aumento a medida que se desarrolla el proceso.

Así mismo, Hernández-Garcés et al. (2017) aportan a la presente investigación al enfocarse en las emisiones y contaminantes que generan estos procesos productivos, señalando que la evaluación de los contaminantes atmosféricos emitidos por los generadores de vapor de centrales azucareras analizadas, arrojó resultados de emisión de varios órdenes, mayores que los de los generadores de vapor convencionales que emplean hidrocarburos como combustible, pero inferiores a los de las termoeléctricas y grupos electrógenos. Sostienen que las chimeneas presentan grandes emisiones para material particulado (MP) y Óxidos de Nitrógeno (NO_x). La mayor contribución, lógicamente, es el MP, causado esencialmente por el empleo de bagazo como combustible. Por otra parte, ninguna de las emisiones resultantes de Dióxido de Azufre (SO_2) sobrepasa los límites establecidos en la norma cubana, debido al bajo contenido de azufre en el bagazo quemado. Asimismo, los valores más bajos se atribuyen al SO_2 . Para establecer esto, utilizaron métodos teóricos, el hipotético-deductivo y la modelación para poder cumplir los objetivos propuestos; estimaron las emisiones de los contaminantes atmosféricos y emplearon los factores de emisión para fuentes puntuales o estacionales, tomando como factores de emisión, a MP, NO_x , SO_2 .

Nacionales

Por su parte, Buitrago (2017) da a conocer que la concentración de dióxido de carbono (CO_2) en el gas provocado por la pirólisis tiene una alta variación, aun cuando se utiliza parámetros experimentales iguales. Además, la producción de líquido de pirólisis para el bagazo de caña panelera se maximiza para una temperatura de estabilización de 800 °C y la tendencia de la concentración de los gases que se produce en el proceso se mantienen para parámetros experimentales iguales. Este autor brinda una información importante en su marco teórico, del cual se toma a consideración y análisis al poder calorífico, donde lo define como la cantidad de calor liberado cuando el combustible es oxidado por completo en un proceso estable y los productos vuelven al mismo estado de los reactantes. Como resultados, establece una caracterización termoquímica del bagazo, donde señala parámetros como humedad total (10,69 %) cenizas (9,9 %) materia volátil (66,09 %) carbono fijo (13,33 %) poder calorífico (3229 Kcal/kg) y, resalta el porcentaje



atribuido a materia volátil, dando una amplia idea del poder de combustión que puede llegar a tener el bagazo; su poder calorífico presenta un valor representativo frente a esta biomasa.

La investigación de Roncancio (2012) se enfocó en el estudio del nitrógeno. En el caso de las emisiones de NO_x , el nitrógeno presente en el bagazo fue menor al del carbón, reduciendo así la cantidad de este elemento, que podría reaccionar con los radicales de oxígeno presentes en el aire de combustión, generando óxidos de nitrógeno. Observó que las temperaturas de combustión estaban por debajo de los 1200°C , punto en el cual inicia la generación de NO_x térmico, por lo cual no se puede concluir que la reducción en la temperatura implique una disminución del contaminante. Concluye que el bagazo de caña colombiano tiene un poder calorífico de 7473 Btu/lb que, comparado con el del carbón 12745 Btu/lb, es significativo en cuanto a su nivel energético; esto permite obtener beneficios ambientales sin perder mucha potencia.

Marco teórico

La composición física del bagazo de caña varía entre límites muy estrechos; su propiedad más importante en cuanto a sus cualidades es la humedad; este valor se ubica entre el rango de contenido de humedad como madera húmeda (del 20 al 30 %), debido a su origen y, aun después de secado, no pierde la totalidad de humedad ya que, como materia prima, se comporta como un material “higroscópico” (Pérez-Peña et al., 2011, p. 257); esto es, que tiene la propiedad de ceder o ganar humedad en el intercambio con la humedad existente en el medio ambiente que le rodea.

El bagazo puede ser considerado como un residuo agrícola o de cosecha. Según Infoagro (2016), los residuos de cosecha o agrícolas son la parte de un cultivo que no cumple con los requisitos mínimos de calidad para ser comercializada; pueden ser subproductos de origen vegetal generados por las industrias de transformación agrícolas.

El bagazo de caña de azúcar es un material lignocelulósico constituido principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, representa aproximadamente entre el 25 y 40 % del total de materia procesada, dependiendo del contenido de fibra de la caña y la eficiencia en la extracción del jugo (Pernalet et al., 2008, p. 3)

La biomasa lignocelulósica es una mezcla compleja de polímeros de carbohidratos conocidos como celulosa, hemicelulosa, lignina y pequeñas cantidades de otras sustancias como extractables y cenizas, los cuales están contenidos en la pared celular de las plantas.

Según Peña (2010),

Las cenizas son el residuo inorgánico que queda tras eliminar totalmente los compuestos orgánicos de la muestra; [la ceniza supone el 5 % de la materia seca]. El contenido de cenizas se usa como índice de calidad en algunos alimentos como mermeladas y jaleas. En estos productos el contenido de cenizas es



indicativo del contenido de frutas en los mismos: por lo tanto, se considera como índice de adulteración, contaminación o fraude. (párr. 4/9)

Para generar el proceso de combustión del bagazo a acondicionar, una opción viable es la utilización de briquetas de carbón las cuales, según García (2014),

son un producto hecho a base de desechos maderables (aserrín principalmente), que mediante un proceso de compresión compactan las partículas de aserrín formando un producto con propiedades caloríficas adecuadas para su utilización en los distintos sectores donde se requiere fuentes de energías caloríficas. (p. 4)

Las briquetas de carbón son una alternativa completamente ecológica, sin riesgos de mayor contaminación y pueden ser elaboradas utilizando desechos orgánicos. La fabricación de briquetas más empleadas es la que está hecha de aserrín; no llegan a emplear ningún tipo de aglomerante ya que la humedad y la propia lignina de la madera funcionan como adhesivo natural (Samamé, 2017).

Para generar el proceso de combustión del bagazo a acondicionar, una opción viable es la utilización de briquetas de carbón, las cuales según García (2014), son un producto hecho a base de desechos maderables que, mediante un proceso de compresión, compactan las partículas formando un producto con propiedades caloríficas adecuadas para su utilización en los distintos sectores donde se requiere fuente de energías caloríficas.

La tecnología de combustión o co-combustión hace referencia a un proceso en el cual la interacción térmica y química entre la biomasa (en este caso el bagazo de caña de azúcar), el carbón y la mezcla oxidante permite producir energía sostenible en una planta de potencia, reduciendo las emisiones de CO_2 , SO_x y NO_x .

Cuando se habla de pirólisis del bagazo de caña, se hace referencia a uno de los procesos más eficientes de degradación térmica de una sustancia en ausencia de oxígeno, donde son descompuestas mediante calor, sin que se produzcan las reacciones de combustión. Este proceso termoquímico encargado de convertir la materia orgánica, como el caso del presente estudio en combustibles útiles con alto rendimiento, mediante calentamiento a temperatura moderadamente alta (350-650 °C) es el método más eficaz para competir con las fuentes de combustibles no renovables (Urien, 2013).

Marco conceptual

Pirólisis: es un proceso termoquímico en el que materiales orgánicos son sometidos a temperaturas superiores a 400 °C en condiciones de bajo o nulo oxígeno, convirtiendo estos materiales a sólidos y líquidos de alta densidad energética (Vilca et al., 2022).

Briqueta de carbón: las briquetas o leñetas son una fuente de energía calorífica cambiabile, ya que son sistematizadas como bioenergía sólida que tiene la utilidad como comburente (biocombustible) en diferentes actividades como en calderas, hornos, parrillas, cocinas, etc. (Samamé, 2017).



Combustión: proceso que consiste en someter la biomasa a oxidación, en condiciones de elevada temperatura y con exceso de oxígeno, donde se obtiene como producto final, calor, que se usa para complementar un proceso específico, implicando que el combustible (biomasa) alcance temperaturas altas para mantener la reacción en presencia del comburente, es decir el oxígeno (Nogales, 2016).

Emisiones atmosféricas: las elevadas emisiones de contaminantes hacia la atmósfera son la causa de diversos problemas ambientales en la actualidad, desde el nivel local hasta la escala global. Para su evaluación, lo más común es estimar el Dióxido de Azufre (SO_2), Óxidos de Nitrógeno (NO_x), y el MP menor de 10 y 2,5 micrómetros (PM_{10} y $\text{PM}_{2,5}$), emitidos por generadores, como pueden llegar a ser las centrales azucareras. Para este estudio es común utilizar el método de cálculo basado en el factor de emisión para determinar la tasa de emisión de estos contaminantes.

Poder calorífico: el poder calorífico del bagazo de caña de azúcar (como combustible) es un factor determinante en el balance térmico de una fábrica panelera. Después del proceso de pirólisis se puede concluir que el poder calorífico con este tratamiento produce mejor energía calorífica y eficiencia (Samamé, 2017).

Acondicionamiento: en Colombia, el uso del bagazo de caña de azúcar se utiliza para la generación eléctrica. Ante las necesidades energéticas mundiales, se ha profundizado en la pirólisis del bagazo de caña de azúcar para la producción de biocombustibles (Buitrago, 2017).

Trapiche: molino para extraer el jugo de algunos frutos de la tierra, como las aceitunas y la caña de azúcar. Esta tecnología de extracción se ha utilizado desde hace muchos años, principalmente en las zonas menos desarrolladas, donde se extrae el jugo de la caña de azúcar y se lleva a una poza donde se recoge; de allí pasa a los fondos de la hornaza, donde con la candela se cuaja la miel.

Biomasa: es “la fracción biodegradable de productos, desechos y residuos de la agricultura (incluyendo sustancias vegetales y animales), silvicultura e industrias relacionadas, así como la fracción biodegradable de los residuos municipales e industriales” (Cerde, 2012, como se cita en Mendoza, 2022, párr. 16)

Contaminación atmosférica: el uso de la energía, en todas sus formas, proporciona un enorme beneficio a la sociedad; sin embargo, también está asociado a numerosos desafíos medioambientales y sociales. La generación de electricidad a partir de combustibles fósiles produce diferentes impactos negativos; el más significativo a nivel local es la contaminación atmosférica; a nivel regional, la lluvia o deposición ácida y, a nivel global, el cambio climático.

Marco contextual

El desarrollo de esta propuesta de investigación se dio en tres lugares claves: el municipio de Sandoná donde se encuentran los trapiches, el trapiche del cual se toma las muestras de bagazo, es decir el producto a estudiar y, el municipio de

El municipio de Sandoná está ubicado en el departamento de Nariño, a 48 kilómetros aproximadamente de la capital del departamento, San Juan de Pasto. Presenta una altura de 1940 m s.n.m. y su superficie es de 9 700 hectáreas; una temperatura promedio de 17 °C; una humedad del 91 %. Coordenadas de latitud 1 283, longitud -77,467, latitud 1° 16 ' 59 ' ' Norte, y longitud 77° 28 ' 1 ' ' Oeste. A sus límites está los municipios de Linares, La Florida, El Tambo y Ancuya.

El trapiche Carmelita se ubica en el corregimiento de El Ingenio, más o menos a 4 Km de la cabecera del municipio de Sandoná (Figura 1). El municipio de Pasto está ubicado en el departamento de Nariño, a una altitud de 2 543 m s.n.m. con una superficie de 113 100 hectáreas; cuenta con, aproximadamente, 383 846 habitantes (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE, 2018).

En este municipio se halla el laboratorio del ‘Campus Alvernia’, perteneciente a la Universidad Mariana, donde se realiza los tratamientos y simulaciones para esta propuesta de investigación, al oeste de la ciudad, con dirección Cl. 7 Oe. #35858, Pasto, Nariño.

Ubicación del municipio de Sandoná y zona de estudio





Metodología

La manera para obtener los resultados esperados se basa en una metodología analítica experimental, como se explica a continuación:

Paradigma de investigación

La línea y campo de investigación es ambiental, debido a su desarrollo en el campo para controlar la contaminación y el aporte de estrategias de producción más limpia que permitan la disminución de emisiones y, por ende, evitar el deterioro de la calidad del aire.

Esta investigación aplica a un área de control de la contaminación, dada la proliferación de contaminantes en el aire que se presenta por la actividad productiva que genera el residuo de bagazo. Así, se promueve el desempeño de medidas de impacto óptimas, definiendo estrategias técnicas y económicas para minimizar la contaminación.

Enfoque de investigación

Enfoque mixto: cuanti-cualitativo relacionado con la forma de analizar las variables dependientes como temperatura de pirólisis, presión de esta y cantidad de combustible; e independientes, como gases de emisión de bagazo crudo, gases de emisión de bagazo acondicionado y composición del bagazo.

Tipo de investigación

Analítico-experimental donde se lleva a cabo un análisis de la evaluación en el nivel de variación en la presentación de gases al acondicionar el bagazo de caña experimentalmente por medio de pirólisis en la producción de panela.

Población y muestra / Unidad de trabajo y unidad de análisis

La población corresponde a los trapiches presentes en el municipio de Sandoná, ubicados en las zonas urbana y rural, de los cuales se escogió uno, estratégicamente y a conveniencia correspondiente a la muestra, ubicado en el corregimiento de El Ingenio, a 4 km aproximadamente del municipio de Sandoná.

Técnica e instrumentos de recolección de información

En la Tabla 1 se presenta las diferentes actividades a desarrollar, las cuales permiten el desarrollo de los distintos objetivos:

Tabla 1

Actividades para el cumplimiento de los objetivos a desarrollar

Objetivos	Meta	Actividad	Producto
Caracterizar el bagazo de caña utilizado como combustible en el proceso de fabricación de panela	Conocer las principales características fisicoquímicas del bagazo de caña.	Visita de caracterización del proceso de producción de panela en el trapiche.	Descripción cualitativa del proceso productivo por medio de un diagrama de flujo.
		Análisis de flujos de materia y energía en el proceso.	Balance de materia y energía para el proceso de fabricación de panela.
		Toma de muestra integrada de bagazo del trapiche, seleccionado durante un proceso de obtención de panela.	Muestra de bagazo (kg) para análisis y acondicionamiento.
		Realización de pruebas físico químicas en laboratorio hacia el bagazo crudo.	Características fisicoquímicas del bagazo.
Implementar un proceso de simulación de pirólisis en el laboratorio, que permita el acondicionamiento del bagazo de caña.	Acondicionamiento funcional del bagazo de caña como carbón para combustión.	Elaboración de briquetas de prueba para bagazo de caña crudo y acondicionado (carbón de bagazo).	Medio adecuado (briqueta) para la combustión del bagazo.
		Parametrización del proceso de pirólisis adecuado al bagazo de caña.	Parámetros para la pirólisis.
		Estandarización del proceso de pirólisis en laboratorio.	Proceso de pirólisis estandarizado en pruebas piloto.
		Obtención de carbón de bagazo de caña.	Masa de carbón de bagazo de caña.



Cuantificar las emisiones generadas por el bagazo de caña antes y después del tratamiento.	Verificación de la diferencia de emisiones y poder calorífico entre briquetas crudas y acondicionadas experimentales de las emisiones producto, antes y después del tratamiento.	Parametrizar un proceso de combustión adecuado.	Parámetros de combustión
		Estandarizar la combustión adecuada bajo los procesos de producción de caña.	Proceso de combustión estandarizado
		Mediciones durante proceso de combustión con bagazo crudo y acondicionado.	Concentración de gases de combustión.
		Cuantificar emisiones de bagazo de caña crudo y acondicionado.	Concentración de emisiones y caudal de flujo.
		Cuantificación de la variación en la emisión de gases entre tratamientos.	Tratamiento más eficaz, que produce menos emisiones de gases.
		Analizar el comportamiento en la reducción de emisiones entre tratamientos.	Relación y comparación de los resultados obtenidos respecto a las normas relacionadas.

Las técnicas de investigación

Se presenta dos experimentos conformados por un diseño de experimento aleatorio de efectos principales (Tabla 2) y experimento unifactorial de efectos fijos (Tabla 3), con el propósito de realizar una selección de carbón preliminar y, posteriormente, comparar las emisiones entre tratamientos.

Tabla 2*Diseño experimental: experimento aleatorio de efectos principales*

OBJETIVO	Producir carbón por medio de la pirólisis a partir del bagazo de caña.
VARIABLE DE RESPUESTA	Potencial calorífico
	Composición química
FACTORES DE ESTUDIO	Temperatura
	Tiempo
	Aglutinante
NIVELES DE LOS FACTORES	T°1 T°2 T°3
	t1, t2, t3
	A1, A2, A3
FACTORES DE DISEÑO	Masa de bagazo
	Cantidad de aglutinante
FACTORES DE RUIDO	Humedad del bagazo
	Tiempo de almacenamiento del bagazo

Nota: cuando se habla de factores de ruido se hace referencia a los parámetros que no podemos controlar o que no son el centro de la investigación; sin embargo, en los análisis y muestreo de esta investigación se optará por hacerlo, con un bagazo seco y con un tiempo de almacenamiento menor a diez días.

Para el desarrollo del experimento se estableció una tabla de orden estándar (Tabla 3) que presenta los tratamientos a realizar y las combinaciones estratégicas para el desarrollo, resaltando que el carbón con mayor poder calorífico, nombrado como 'carbón seleccionado', será el que se implementará en el diseño unifactorial de efectos fijos, posterior a realizar.

Tabla 3*Tabla de orden estándar para el Experimento aleatorio de efectos fijos*

TRATAMIENTOS	N^k	3^3= 27	De los cuales se escogerán únicamente 9, de acuerdo al método de N^k-1	N^k-1	3^3-1=9		
TRATAMIENTO	TEMPERATURA	TIEMPO	AGLUTINANTE	VR-R1	VR-R2	VR-R3	
1	1	1	1				
2	2	1	1				
3	3	1	1				
4	1	2	1				
5	2	2	1				
6	3	2	1				
7	1	3	1				
8	2	3	1				
9	3	3	1				



Nota: de los anteriores tratamientos, se escogerá nueve al azar con sus respectivas combinaciones, y se realizará tres repeticiones por cada uno de ellos en días diferentes, para lograr un valor más significativo y confiable.

Tabla 4

Diseño experimental: experimento unifactorial de efectos fijos

OBJETIVO	Cuantificar y comparar las emisiones atmosféricas entre tratamientos.
VARIABLE DE RESPUESTA	Emisiones atmosféricas
FACTOR	Material usado para la combustión
NIVELES DEL FACTOR	Bagazo crudo
	Carbón seleccionado

Nota: este experimento está relacionado directamente con la hipótesis propuesta, que se busca aceptar o rechazar a partir de la variable de respuesta de este experimento.

Es importante mencionar que, el tamaño de la muestra será establecido mediante un ensayo o experimento preliminar; del mismo modo, para los análisis de datos se utiliza gráficos como los de Pareto en SIGMAPLOT y software estadístico como SPSS y R-STUDIO.

Resultados esperados

Por medio de esta investigación se busca realizar una caracterización fisicoquímica del combustible bagazo, analizando sus propiedades principales, así como también, hacer una parametrización adecuada para la combustión de unos experimentos control. Se obtendrá un carbón de bagazo por medio de la pirólisis, para la medición de emisiones y su respectivo análisis y comparación con el experimento control.

Por medio del cumplimiento de las actividades se obtendrá un diagrama de descripción cualitativa en donde se observe el proceso productivo y se identifique operaciones unitarias que generan emisiones.



Referencias

- Aldana, J. C., Ortiz, L. F. y Triana, C. A. (2020). *Formulación teórica para la obtención de filmes y revestimientos a base de almidón de yuca* [Tesis de Pregrado, Universidad ECCI]. <https://repositorio.ecci.edu.co/bitstream/handle/001/1379/Trabajo%20de%20grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Buitrago, L. A. (2017). *Pirólisis del bagazo de caña de azúcar* [Tesis de Pregrado, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/39789>
- Decreto 2107 de 1995. (1995, 30 de noviembre). Presidencia de la República de Colombia. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=7128>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2018). Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/presentaciones-territorio/190726-CNPV-presentacion-Narino-Pasto.pdf>
- Fonseca, S. E. (2002). *Guía ambiental para el subsector panelero*. FedePanela.
- García, M. E. (2014). *Diseño de proceso y de planta piloto para fabricación de briquetas de aserrín* [Tesis de Pregrado, Universidad de Piura]. https://pirhua.udpe.edu.pe/bitstream/handle/11042/1829/ING_535.pdf?sequence=1
- Hernández-Garcés, A., Reinoso-Valladares, M. y Hernández-Bilbao, F. (2017). Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros espirituanos. *Márgenes*, 5(2), 1-11.
- Infoagro. (2016). Concepto de residuos agrícolas y características generales. <https://mexico.infoagro.com/concepto-de-residuos-agricolas-y-caracteristicas-generales/>
- Labrada, B. L. (2009). *Estudio de la pirólisis discontinua del bagazo de caña. Tecnología química Vol. 18. Nos. 1 y 2, 1998*. Editorial Universitaria, 2009.
- Ley 2005 de 2019. (2019, 2 de diciembre). Congreso de la República de Colombia. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=124418>
- Mendoza, E. (2022). La biomasa como energía renovable. <https://fotonasesores.com/la-biomasa-como-energia-renovable/>
- Oficina Internacional del Trabajo (OIT). (2013). El desarrollo sostenible, el trabajo decente y los empleos verdes. *Conferencia Internacional del trabajo, 102.ª reunión*. https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/ed_norm/relconf/documents/meetingdocument/wcms_210289.pdf



- Peña, C. M. (2010). Determinación de cenizas totales o residuo mineral. <http://avibert.blogspot.com/2010/12/determinacion-de-cenizas-totales-o.html>
- Pérez-Peña, N., Valenzuela, L., Díaz-vaz, J. E. y Ananías, R. A. (2011). Predicción del contenido de humedad de equilibrio de la madera en función del peso específico de la pared celular y variables ambientales. *Maderas, Ciencia y Tecnología*, 13(3), 253-266. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2011000300002>
- Pernalet, Z., Piña, F., Suárez, M., Ferrer, A. y Aiello-Mazzari, C. (2008). Fraccionamiento del bagazo de caña de azúcar mediante tratamiento amoniacal: efecto de la humedad del bagazo y la carga de amoníaco. *Bioagro*, 20(1), 3-10.
- Nogales, S. (2016). Reducción de las emisiones asociadas a la combustión y pirólisis de biomasa mediante diversos métodos. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=54189&info=resumen&idioma=ENG>
- Resolución 2254 de 2017. (2017, 01 de noviembre). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minambienteds_2254_2017.htm
- Roncancio, J. A. (2012). *Diseño, construcción y puesta en marcha de una cámara de combustión, para Co-firing y Reburn, con el fin de determinar la viabilidad del bagazo de caña como reductor de emisiones de NOx cuando se quema con carbón bajo la tecnología de Co-firing* [Tesis de Maestría, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/11874>
- Samamé, W. E. (2017). *Determinación del poder calorífico de briquetas de carbón utilizando cantidades de residuos de biomasa* [Tesis de Pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/10893/samame_gw.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Urien, A. (2013). *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Educación a Distancia]. https://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf
- Vilca, K., Rodríguez, S., Atarama, U., Cueva, C., Concha, W. J., Atausupa, M. A. y Gosgot, W. (2022). Pirólisis: una revisión de conceptos y aplicaciones en la gestión de residuos sólidos. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 6(1), 43-56. <https://doi.org/10.25127/aps.20221.854>