

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**COMPORTAMIENTO DEL BIOCARBÓN DE
Cupressus lusitanica (Mill) PRODUCIDO A DIFERENTES
TEMPERATURAS DE PIRÓLISIS,
CARTAGO, COSTA RICA**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERA FORESTAL CON EL GRADO ACADÉMICO DE
LICENCIATURA CON ÉNFASIS EN MANEJO Y PRODUCCIÓN FORESTAL**

ANGIE XIMENA RODRÍGUEZ ROSALES

CARTAGO, COSTA RICA

MARZO, 2023

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**COMPORTAMIENTO DEL BIOCARBÓN DE
Cupressus lusitanica (Mill) PRODUCIDO A DIFERENTES
TEMPERATURAS DE PIRÓLISIS,
CARTAGO, COSTA RICA**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERA FORESTAL CON EL GRADO ACADÉMICO DE
LICENCIATURA CON ÉNFASIS EN MANEJO Y PRODUCCIÓN FORESTAL**

ANGIE XIMENA RODRÍGUEZ ROSALES

CARTAGO, COSTA RICA

MARZO, 2023

**COMPORTAMIENTO DEL BIOCARBÓN DE *Cupressus lusitanica* MILL
PRODUCIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE PIRÓLISIS, CARTAGO,
COSTA RICA**

Angie Rodríguez Rosales

RESUMEN

La elaboración de carbón a partir de residuos orgánicos ha tomado mayor relevancia en los recientes años debido a la necesidad de buscar fuentes alternativas de energía como respuesta a la crisis mundial. Uno de los principales métodos para la producción de biocarbón es el proceso de pirólisis, el cual consiste en llevar el material vegetal a temperaturas superiores los 250 °C en un ambiente sin oxígeno durante un tiempo conocido.

El presente estudio evaluó el comportamiento del carbón producido a cinco temperaturas de pirólisis (300 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C). Se evaluó la densidad del material carbonizado, el contenido de humedad, el porcentaje de cenizas y de material volátil, así como el análisis de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón mediante ensayos termogravimétricos (TGA) y de espectrofotometría infrarroja (FT-IR). Se utilizó madera de ciprés (*Cupressus lusitanica*) como materia prima para la elaboración del carbón, el proceso se llevó a cabo en un reactor con capacidad de 3 litros para generar la atmósfera sin oxígeno y permitir la pirólisis.

Los resultados mostraron una variación en cuanto a los rendimientos de los productos y las propiedades del carbón y la producción de gases no condensables al aumentar la temperatura. En el caso del bioaceite se observó un aumento directo del rendimiento con la temperatura hasta los 450 °C, sin embargo, para la temperatura de 500 °C el rendimiento disminuyó. Se observó además una tendencia de incremento del poder calórico con la temperatura de pirólisis, el material carbonizado a 450 °C presentó el valor más alto de poder calórico (34 006 kJ/kg), mientras que el carbón a 500 °C presentó un poder calórico menor, mostrando que el rendimiento del carbón se reduce con un incremento de la temperatura en este rango debido a la pérdida sustancial de material volátil o a la descomposición secundaria del biocarbón. Por otro lado, se tiene que los tratamientos de mayor temperatura, 450 °C y 500 °C presentaron los contenidos más altos de carbono, con un 80,67% y un 85,08% respectivamente, lo que indica un aumento del carbono directo con la temperatura.

Se considera la temperatura de pirólisis a 450 °C como la más recomendable para la especie de *C. lusitanica*, ya que presentó resultados mayormente ideales en las variables evaluadas, alto poder calórico, bajo contenido de cenizas y volátiles, además de hidrofobicidad óptima para aplicación en suelos.

Palabras clave: pirólisis, carbonización, biocarbón, residuos lignocelulósicos

BEHAVIOR OF BIOCHAR OF *Cupressus lusitanica* MILL PRODUCED AT DIFFERENT PYROLYSIS TEMPERATURES, CARTAGO, COSTA RICA

Angie Rodríguez Rosales

ABSTRACT

The production of charcoal from organic wastes has become more relevant in recent years due to the need to develop alternative sources of energy in response to the global crisis. One of the main methods to produce biochar is pyrolysis, which consists of heating the organic material to temperatures above 250 °C in an oxygen-free environment for a known period.

The aim of the study was to evaluate the behavior of *Cupressus lusitanica* (cypress) biochar at five pyrolysis temperatures (300 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C, 500 °C), by measuring parameters such as the density of the carbonized material, moisture content, percentage of ash and volatile material, and by analyzing the physicochemical properties of the biochar using thermogravimetric (TGA) and infrared spectrophotometric (FT-IR) tests.

Cypress wood (*Cupressus lusitanica*) was used as raw material for charcoal production, the process was conducted in an industrial reactor with nitrogen to generate the oxygen-free atmosphere and to enable pyrolysis.

The results showed a variation in terms of product yields and coal properties with increasing temperature, the production of non-condensable gases, for example, are encouraged due to secondary reactions.

The bio-oil showed a direct increase in yield with temperature up to 450 °C, however, at 500 °C the yield decreased. It was also observed a tendency of increasing calorific value at higher pyrolysis temperature, the biochar at 450 °C temperature presented the highest value of caloric power being this equal to 34 005.94 kJ/kg, however, the biochar at 500 °C presented a lower calorific value, showing that the biochar yield decreases with an increase in temperature due to substantial loss of volatile matter or secondary decomposition of the biochar at a temperature higher than 450 °C.

On the other hand, it is known that the highest temperature treatments, 450 °C and 500 °C, showed with the highest carbon contents with 80.67 % and 85.08 % respectively, which indicates an increase in direct carbon with the temperature. The pyrolysis temperature of 450 °C is considered the most recommendable for the *C. lusitanica*, since it showed mostly ideal results in the variables evaluated, high caloric power, low ash content and low volatile content, in addition to optimal hydrophobicity for soil application.

Keywords: pyrolysis, carbonization, biochar, lignocellulosic waste



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Rodríguez-Rosales, A. (2022). Comportamiento del biocarbón de *Cupressus lusitanica* Mill producido a diferentes temperaturas de pirólisis, Cartago, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Escuela de Ingeniería Forestal, Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente el día 7 de marzo del 2023 ante el Tribunal Evaluador integrado por Ph.D. Roger Moya Roque, Dra.-Ing. Carolina Tenorio Monge y Ph.D. Jaime Quesada Monge como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal con énfasis en Manejo y Producción forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Firmado digitalmente por ROGER ALONSO MOYA ROQUE (FIRMA)
Fecha: 2023.04.27 16:25:28 -06'00'

Roger Moya Roque Ph.D.

Director del trabajo final de graduación

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Firmado digitalmente por CAROLINA TENORIO MONGE (FIRMA)
Fecha: 2023.05.02 08:13:34 -06'00'

Carolina Tenorio Monge Dra.-Ing.

Profesora lectora

TEC | Tecnológico de Costa Rica
Firmado digitalmente por DORIAN MAURICIO CARVAJAL VANEGAS (FIRMA)
Fecha: 2023.04.27 15:39:13 -06'00'

Jaime Quesada Kimzey Ph.D.

Profesor lector

Dorian Carvajal Vanegas M.Sc.

Coordinador de trabajo final de graduación



Angie Rodríguez Rosales

Estudiante

DEDICATORIA

A mis padres que se lo merecen todo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme llegar al final de mis estudios universitarios.

A mis padres, Oscar Rodríguez Santana y María Elena Rosales Obando, por siempre apoyarme, por nunca negarme nada, por todos los sacrificios que han hecho desde el amor para que yo pudiera estudiar.

A mis hermanos y familia por el apoyo.

Al profesor Roger Moya por ser mi tutor y una excelente guía durante la elaboración de este proyecto, por tener en todo momento la disposición de ayudarme.

A la profesora Carolina Tenorio y el profesor Jaime Quesada por dar lectura a mi trabajo y por el aporte de sus conocimientos.

A la profesora Lupita Vargas por su orientación y consejos durante toda la carrera.

Al personal del Laboratorio de Biomateriales de la Escuela de Ingeniería Forestal: Didier Tencio, Robert Cubero y Carlos Olivares, por su importante colaboración.

Al grupo cultural Teatro-TEC por ser parte fundamental de mi formación humanística y por hacer más amena mi estadía en la universidad. Gracias a todas las personas maravillosas que conocí en el grupo.

A las amistades que hice en estos años, a las que en su momento fueron el más grande apoyo, a las que permanecen, a las personas que hicieron que mi último año fuera el mejor de todos.

A todas aquellas personas que me motivaron a seguir, que me mostraron su cariño y creyeron en mí cuando más lo necesitaba. Gracias.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VI
ÍNDICE DE CUADROS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
1. INTRODUCCIÓN	7
2. MATERIAL Y MÉTODOS	10
2.1. Evaluación de la materia prima	10
2.2. Proceso de carbonización	11
Tratamientos aplicados.....	11
2.3. Evaluación del proceso de carbonización	12
Variación de temperatura con el tiempo	12
Rendimiento del proceso en los diferentes tipos de productos	12
Determinación del rendimiento del carbón	12
Determinación de los gases condensables y los no condensables.....	13
Determinación de los No condensados	13
2.4. Evaluación de propiedades físicas y mecánicas del carbón	13
Contenido de humedad del carbón	14
Densidad del carbón.....	14
Resistencia a la compresión del carbón.....	14
Evaluación termogravimétrica y derivada de la masa.....	15
Espectroscopía FT-IR.....	15
2.6. Evaluación del carbón como bioenergía	16
Determinación de cenizas y volátiles	16
Determinación del poder calórico	17
2.7. Caracterización química del biocarbón	17
2.8. Evaluación del biocarbón como tratamiento en suelos	18
Determinación del pH y la conductividad eléctrica	18
Determinación de la hidrofobicidad	18
2.9. Análisis estadístico	18
3. RESULTADOS	19
3.1. Evaluación del proceso de carbonización	19

Variación de la temperatura en función del tiempo	19
Rendimiento del biocarbón	21
Rendimiento de los condensados y los no condensables	21
3.2. Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas.....	23
Evaluación como bioenergía	24
Poder Calórico.....	24
Cenizas y volátiles.....	24
Resistencia a la compresión	24
3.3. Análisis termogravimétrico (TGA) y FT-IR	25
Análisis de espectrofotometría	26
3.4. Propiedades químicas.....	27
3.5. Biocarbón como tratamiento de suelos.....	28
Evaluación de pH y conductividad eléctrica	28
Hidrofobicidad del material carbonizado	29
4. DISCUSIÓN.....	30
4.1. Evaluación del proceso de pirólisis	30
4.2. Evaluación de los productos	30
4.3. Evaluación de propiedades físicas y mecánicas	31
4.4. Análisis termogravimétrico y FT-IR.....	32
Análisis de espectrofotometría infrarroja (FT-IR)	33
4.5. Evaluación energética.....	34
4.6. Caracterización química del biocarbón.....	35
4.7. Evaluación como enmiendas de suelos	36
5. CONCLUSIONES.....	38
6. RECOMENDACIONES.....	38
7. REFERENCIAS	40

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características del carbón de ciprés producido a diferentes temperaturas de pirólisis	25
Cuadro 2. Evaluación de los principales elementos, conductividad, pH y rango de humectación del biocarbón de <i>Cupressus lusitanica</i> producido a cinco diferentes temperaturas de pirólisis. .	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variación de la temperatura con respecto al tiempo en las diferentes partes del reactor, (a) dentro del reactor, (b) salida de vapores, (c) antes de la condensación.	21
Figura 2. Evaluación del rendimiento de los productos de pirólisis de madera de Ciprés	22
Figura 3. Aspecto general del carbón y los subproductos del proceso de pirólisis	23
Figura 4. Análisis termogravimétrico (4a) y derivada de la masa (4b) de carbón a diferentes temperaturas.	26
Figura 5. Espectro del carbón de ciprés formado a diferentes temperaturas de pirólisis	27
Figura 6. Variación del ángulo de contacto del carbón producido a diferentes temperaturas de pirólisis	29

1. INTRODUCCIÓN

El proceso de pirólisis consiste en una reacción endotérmica en la que la descomposición de la materia orgánica se produce a elevadas temperaturas en ausencia de oxígeno o en una atmósfera de gas inerte (Hoang et al., 2021). El proceso de pirólisis es uno de los métodos más comunes para convertir desechos de biomasa en carbón con el interés de utilizarlo como una alternativa de fuente de energía y como enmiendas en suelos, debido a las desventajas que tiene el uso directo de los desechos lignocelulósicos al no cumplir con los requisitos bioquímicos (fermentación, digestión anaerobia, división fotobiológica del agua) (Zhao et al., 2022).

La biomasa de residuos lignocelulósicos es uno de los principales tipos de residuos que se utilizan para la producción de biocarbón. Se trata de un material de origen vegetal compuesto principalmente por celulosa, lignina y hemicelulosa, es una fuente de energía beneficiosa, principalmente debido al bajo contenido de nitrógeno y azufre y a la relativamente baja emisión de CO₂ (Biswas et al., 2017). Los materiales lignocelulósicos se pueden extraer de una variedad de fuentes, por ejemplo, a partir de bosques primarios y secundarios, a partir de cultivos destinados a generar biomasa (plantaciones dendroenergéticas), o a partir de residuos de cultivos agrícolas y forestales (Quesada, 2012).

La producción de biocarbón en Costa Rica surge hace aproximadamente 20 años y Talamanca ha sido una zona de atención para la aplicación de proyectos y promoción del desarrollo rural, para la aplicación de biocarbón como enmienda (Segura, 2018) y la región del Guarco en Cartago por muchos años ha sido el principal sitio de la producción de carbón como fuente energética (CATIE, 2018). Diversos estudios han demostrado la capacidad que posee el biocarbón no solo como alternativa de fuente energética, si no como tratamiento en la mejora del suelo y en el tratamiento de aguas residuales (Nawaz & Kumar, 2022; Pereira Lopes & Astruc, 2021).

De dicho proceso se produce una fase gaseosa de la que se obtienen dos tipos de compuestos: materiales sólidos (biocarbón) y componentes volátiles (gases de pirólisis). En el caso de estos últimos componentes, se condensan y forman una fase líquida viscosa, que se puede convertir en bioaceite y los compuestos volátiles de bajo peso molecular que permanecen en fase gaseosa como dióxido de carbono, hidrogeno, monóxido de

carbono, metano e hidrocarburos ligeros (Kosakowski et al., 2020). El bioaceite de pirólisis es una mezcla de compuestos orgánicos que contienen una masa de compuestos altamente oxigenados, como fenoles, cetonas, ácidos y carboxilos (Biswas et al., 2017), En el caso del biocarbón este consiste en la recuperación de carbono orgánico, que contiene macro y micronutrientes (Usman et al., 2015). Es un producto sólido producido a partir de la conversión térmica de materiales inestables enriquecidos en carbono en materiales carbonizados estables enriquecidos en carbono que pueden incorporarse a los suelos como medio de gestión agronómica o ambiental (Lehmann et al., 2011).

El proceso físico y las reacciones químicas que se producen en pirólisis son muy complejas, y tanto las condiciones de pirólisis como la matriz orgánica afectan a la calidad del biocarbón, a sus propiedades finales y a sus diferentes componentes volátiles; estos parámetros pueden ser útiles a la hora de clasificar los materiales como fuentes potenciales de biocarbón y para evaluar su capacidad para la combustión (Kosakowski et al., 2020).

El proceso de pirólisis, entre otras cosas, es afectado principalmente por la temperatura, el tiempo de exposición del material, la tasa de calentamiento, la tasa de flujo del gas inerte, el tipo y grado de molienda del material (Sakiya et al., 2020). En el caso de la temperatura se tiene que cuando el material es expuesto a diferentes temperaturas, las proporciones de bioaceite, de gas de pirólisis y de biocarbón también varían (Ma et al., 2022; Zhang et al., 2015). Al aumentar la temperatura, la formación de volátiles aumenta y, en consecuencia, la biomasa residual (biocarbón), se reduce, así como al aumentar la velocidad de calentamiento y la temperatura el rendimiento del carbón disminuye debido a la pérdida sustancial de materia volátil (Varma et al., 2019).

La pirólisis se divide en pirólisis lenta, pirólisis intermedia, pirólisis rápida y pirólisis instantánea, clasificadas según la temperatura usada, la velocidad de calentamiento, tiempo de residencia y productos finales. La pirólisis lenta o convencional ocurre en bajas temperaturas, entre 200-300 °C, y un largo tiempo de residencia, es el método tradicional utilizado en la producción de carbón vegetal y de esta se obtiene entre 25-35% de biocarbón y un 20-50% de gas. La pirólisis intermedia ocurre entre 300-450°C, mientras que la pirólisis rápida entre 300-1000°C a una velocidad de calentamiento de aproximadamente 1000°C/min. En los dos últimos tipos se obtiene bioaceite, biocarbón y gas, pero en diferentes proporciones, el producto principal de la pirólisis rápida es el bioaceite, que constituye entre el 65-80% de la biomasa seca (Singh et al., 2016).

Por otra parte, actualmente, en Costa Rica se produce energía con residuos lignocelulósicos a base de madera, sin embargo, aún no se cuenta con información detallada sobre las características de combustión de las especies de mayor uso comercial, por lo que se requiere de investigaciones de diferentes procesos para la producción de energía y los respectivos parámetros energéticos que se evalúan (Moya & Tenorio, 2013). También es necesario comparar las diferencias entre las propiedades del biocarbón en relación con la temperatura de pirólisis para determinar el efecto de la temperatura en la composición y la química superficial del biocarbón (Usman et al, 2015).

Una de las especies forestales estudiadas para la producción de biocarbón es *Cupressus lusitanica* (ciprés), puesto que ha mostrado valores altos de poder calórico, bajos contenidos de cenizas y humedad que determinan un alto índice de combustibilidad, así mismo, esta conífera posee un potencial energético importante debido a los altos volúmenes de desechos o residuos que se obtienen de las distintas industrias (Moya & Tenorio, 2013; Balaguer, 2019).

Es por lo anterior que el objetivo del presente trabajo es analizar el comportamiento del carbón producido de madera de *Cupressus lusitanica* (ciprés) a cinco diferentes temperaturas de pirólisis, mediante la determinación de sus propiedades fisicoquímicas energéticas y de cambio en la composición química mediante análisis de FTIR y TGA. Además, se hace una evaluación de pH y de hidrofobicidad para valorar la utilización del carbón como fertilizante de cultivos.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Evaluación de la materia prima

Para el presente estudio se trabajó con muestras de madera de *Cupressus lusitanica* (ciprés) previamente aserradas con dimensiones de 12 cm x 4 cm x 2 cm (largo x ancho x espesor), se utilizó un total de 120 piezas, 24 por cada tratamiento. Las piezas se encontraban almacenadas en una cámara de aclimatación a una temperatura de 22 °C y una humedad relativa de 66%.

Antes de llevar a cabo el proceso de carbonización, se evaluó la densidad y el contenido de humedad inicial de las piezas. Se utilizaron, además, muestras testigos para la comparación de los mismos parámetros evaluados para el biocarbón (compresión, poder calórico, cenizas, volátiles y la caracterización química).

Para la determinación del contenido de humedad de la materia prima se pesaron primero en condición verde, se llevaron al horno para ser secadas al aire a 105 °C por 24 horas (Balaguer, 2019), pasado el tiempo se pesaron en condición seca para determinar la pérdida de masa mediante la siguiente ecuación 1.

(1)

$$\text{Contenido de Humedad (\%)} = \frac{\text{Peso verde} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$

Para la determinación de la densidad inicial del material, se utilizaron las dimensiones iniciales de las piezas para calcular el volumen, se determinó el peso en condición verde y la densidad se calculó mediante la ecuación 2.

(2)

$$\text{Densidad inicial (g /cm}^3\text{)} = \frac{\text{Peso (g)}}{\text{Volumen (cm}^3\text{)}}$$

2.2. Proceso de carbonización

Para la producción de carbón se utilizó un reactor cilíndrico experimental de 12 cm de diámetro y 30 cm de largo, de una capacidad de 3 litros, provisto de una doble pared donde se sitúa la resistencia de 2000 watts, una válvula por donde entra el gas de nitrógeno y una segunda válvula por donde salen los gases generados durante el proceso de pirólisis (Balaguer, 2019).

Una vez pesadas las muestras, se colocaron dentro del reactor, se inyectó nitrógeno a 0,69 MPa por medio de las válvulas con el fin de crear un ambiente libre de oxígeno, el calentado se inició a una velocidad de 12 °C/min. El proceso de carbonización inició cuando el reactor alcanzó la temperatura de 250 °C, en este punto la madera comenzó a quemarse y fragmentarse convirtiéndose en carbón, es decir, es cuando inicia el proceso de pirólisis (Balaguer, 2019).

A esa temperatura se abrió una llave de salida para que los gases pasaran por un condensador de vidrio por el que circulaba agua fría a través de una bomba con el fin de condensar el vapor de agua, gases de bajo peso molecular, otros gases condensables a temperatura ambiente y bioaceites para su posterior cuantificación. Todos estos productos fueron recolectados en un balón de dos cuellos al final del condensador. Una vez terminado la pirolisis, el recipiente se dejó reposar por aproximadamente 60 minutos con el fin de que se separen las diferentes sustancias por densidad. Luego los subproductos fueron separados por medio de la técnica de decantación, se obtuvo dos sustancias distintas, una solución acuosa y otra más espesa conocida como bioaceite.

El tiempo de cierre se determinó en cada corrida por el instante en que se observó la ausencia de gases de salida del reactor por la válvula 2 y se completó con el apagado de la resistencia de 2000 watts y el cierre de la válvula 2 para impedir el retorno de gases dentro del reactor (Balaguer, 2019).

Tratamientos aplicados

Fue evaluado el comportamiento y el rendimiento del carbón producido a cinco diferentes temperaturas: 300°C, 350 °C, 400 °C, 450 °C y 500 °C, esto con el fin de tener diferentes procesos de pirólisis, baja, media y alta temperatura. Cada tratamiento de temperatura

constó de dos corridas (A y B) con 12 muestras de madera por corrida, para un total de 24 repeticiones por temperatura evaluada.

Nota: Es importante mencionar que la carbonización de madera a 450 °C se efectuó un año antes de la elaboración del presente trabajo, las muestras se encontraban bajo las mismas condiciones que las utilizadas para las demás temperaturas.

2.3. Evaluación del proceso de carbonización

Variación de temperatura con el tiempo

Para la evaluación del proceso fue necesario conocer la duración de las etapas de carbonización y la variación de temperatura en función del tiempo en las diferentes partes donde fueron colocadas las sondas de temperatura que son: (1) el tiempo de salida de los gases, que consiste en el tiempo que transcurre desde el encendido del reactor hasta que se alcanzan los 250 °C, (2) el tiempo de pirólisis y el tiempo de finalización del proceso, los cuales consisten en el momento en el que salen los primeros gases y hasta el momento en el que no se liberan más gases, respectivamente (Balaguer, 2019). Para evaluar la variación de la temperatura se utilizó un monitor de temperatura marca Testo, se colocaron tres sondas para evaluar (a) la temperatura dentro del reactor, (b) la temperatura de los gases al salir por la válvula y (c) la temperatura de los gases antes de la condensación.

Rendimiento del proceso en los diferentes tipos de productos

La evaluación del proceso se basó en evaluar los diferentes productos tales como el biocarbón, el bioaceite y la parte acuosa. El procedimiento para la valoración de los productos y las variables estudiadas se detallan a continuación.

Determinación del rendimiento del carbón

Se midió el peso de las muestras en condición verde y después de la pirólisis de cada corrida. El rendimiento de la carbonización según cada temperatura fue calculado por la ecuación 3.

(3)

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Peso carbon (g)}}{\text{peso muestra de madera (g)}} \times 100$$

Determinación de los gases condensables y los no condensables

Para determinar el rendimiento de los condensados de la pirólisis mediante el sistema de recolección y del enfriamiento de los gases calientes a través de los tubos condensadores, se evaluó la relación entre la masa de los condensados obtenidos del proceso y el peso inicial de la madera de cada corrida en las diferentes temperaturas con la ecuación 4.

$$\text{Condensados (\%)} = \frac{\text{Peso condensados (g)}}{\text{Peso muestra madera}} \times 100 \quad (4)$$

Se consideraron tres tipos de condensados: (a) los totales, que corresponden a la cantidad de líquido total recolectado al final de la carbonización, (b) la solución acuosa y (c) el bioaceite, que son el resultado de la separación de los condensados totales mediante decantación. En el caso de la solución acuosa y el bioaceite, una vez separados, fue pesado cada componente y fue determinado el porcentaje de cada parte utilizando la ecuación 4.

Determinación de los No condensados

En cuanto a la determinación de los productos no condensables se realizó después de conocer los valores de los pesos de los productos condensados y del rendimiento del carbón mediante la ecuación 5.

$$\text{No condensables (\%)} = 100 - (\text{carbón (\%)} + \text{condensados(\%)}) \quad (5)$$

2.4. Evaluación de propiedades físicas y mecánicas del carbón

Contenido de humedad del carbón

Para conocer el porcentaje de humedad del carbón se cortaron 80 muestras de carbón de 2 cm x 2 cm x 2 cm, 8 muestras por corrida, luego se midieron mediante una balanza analítica, el peso después de la pirólisis, y el peso después llevarlas a secado al horno a una temperatura de 105 °C por 24 horas. Para la determinación del contenido de humedad del carbón se utilizó la ecuación 6.

$$\text{Contenido de humedad del carbón (\%)} = \frac{\text{Peso inicial (g)} - \text{Peso seco (g)}}{\text{Peso seco (g)}} \times 100 \quad (6)$$

Densidad del carbón

Para determinar la densidad del carbón se cortaron 16 muestras con dimensiones aproximadas de 2 cm x 2 cm x 2 cm (largo, ancho y espesor) del material carbonizado por cada temperatura evaluada. Para el cálculo de la densidad se utilizó la ecuación 7.

$$\text{Densidad del carbón (g / cm}^3\text{)} = \frac{\text{Peso carbón (g)}}{\text{Volumen muestra carbón (cm}^3\text{)}} \times 100 \quad (7)$$

Resistencia a la compresión del carbón

Para determinar la resistencia a la compresión del carbón se cortaron muestras de 2 cm x 2 cm x 5 cm (ancho x espesor x largo). Fueron tomadas 16 muestras por temperatura, se realizaron ensayos de compresión en sentido paralelo al grano. Se empleó una velocidad de 0,3 mm/min hasta llegar al punto de quiebre. Para dichos ensayos se utilizó una máquina de prueba universal Tinius Olsen con capacidad de 1000 kg. Para los valores de resistencia a compresión, expresados en unidades de kg/cm², se tomó la carga máxima soportada por cada pieza indicada por el programa informático de la máquina y se dividió entre el área de la muestra.

2.5. Evaluación de termogravimétrica y espectroscopia FT-IR

Evaluación termogravimétrica y derivada de la masa

Para esta evaluación, se utilizó un analizador termogravimétrico TGA7, Perkin Elmer, donde la muestra se colocó en una balanza de precisión dentro de un horno que se encarga de calentar y enfriar la muestra durante la experimentación. Se empleó un gas de purga o gas portador, en este caso nitrógeno, para controlar el ambiente (Escalante et al., 2022).

El platillo de la muestra se coloca en un horno en el que se controla la temperatura de calentamiento y el entorno. La masa de la muestra se pesa constantemente y se registra durante el experimento (Cai et al., 2018).

La muestra se calentó hasta alcanzar una temperatura de 750 °C a una velocidad de 25 °C/min. Con los datos recolectados mediante un programa especial se generó un gráfico del porcentaje de la masa remanente en función de la temperatura y de la derivada de la masa en función de la temperatura.

Espectroscopía FT-IR

Las pruebas de espectroscopía infrarroja por transformadas de Fourier describen con precisión los cambios en la química y la estructura del carbón vegetal en función de la temperatura (Constantine et al., 2021; Gosling et al., 2019).

Para tales pruebas se utilizó un espectrómetro FTIR Nicolet 380 (Thermo Scientific, Mundelein, Illinois, EE. UU.) con una sola célula reflectora (equipada con un prisma de diamante) para medir la reflectancia de la luz de las muestras de carbón, se utilizó una muestra de carbón por tratamiento de temperatura, para las que se tamizó el carbón a un tamaño de 420 μm y 250 μm con una malla de 40 y 60 respectivamente.

El equipo se configuró para realizar lecturas acumulando 32 exploraciones a 1 cm^{-1} de resolución, con corrección de fondo de fondo antes de cada medición. Los espectros FTIR obtenidos se procesaron con Spotlight 1.5.1 (Balaguer et al., 2021).

Sobre la muestra incide un haz de luz infrarroja que realiza un barrido en la muestra, la cantidad de luz que pasa por esta, el porcentaje de luz es calculado por la diferencia en la cantidad de luz infrarroja antes y después de pasar por la muestra (Satizabal, A., 2021).

2.6. Evaluación del carbón como bioenergía

Determinación de cenizas y volátiles

El contenido de cenizas corresponde de materiales inorgánicos no combustibles, como sales minerales que se encuentran en el carbón. Para determinar el porcentaje de cenizas se siguió el procedimiento de acuerdo con la norma ASTM D1762-84 (2013). En primer lugar, se pusieron a secar las muestras de carbón tamizadas a 250 μm (0.250 mm) a una temperatura de 70 °C por dos horas para eliminar la humedad. Se llevaron 20 crisoles a 800 °C en el horno de mufla durante una hora para la incineración de cualquier materia orgánica dentro de estos, transcurrido el tiempo indicado, los crisoles fueron colocados en un desecador por una hora y se pesaron en la balanza analítica.

Se pesó aproximadamente un gramo de carbón tamizado, se realizaron 4 repeticiones por tratamiento de temperatura (dos muestras por corridas) y se llevaron al horno de mufla a 800 °C para obtener el contenido de cenizas. Los crisoles con la muestra de carbón se dejaron dentro del horno por un promedio de 2 horas. A continuación, se dejaron enfriar en un desecador durante una hora y después fueron pesadas. Para el cálculo del porcentaje de cenizas se utilizó la ecuación 8.

$$\text{Cenizas (\%)} = \frac{\text{Peso crisol+muestra carbón(g)} - \text{Peso crisol vacío(g)}}{\text{Peso crisol + cenizas (g)}} \times 100 \quad (8)$$

El contenido de volátiles corresponde a la fracción que se transformó en gas durante el proceso de combustión de la materia prima. Se registró la diferencia de la masa de la muestra y la materia volátil se estimó en porcentaje calculando la relación entre la diferencia de la masa y la masa original de la muestra (Ajith Kumar et al., 2021). Para la determinación del porcentaje de volátiles se usaron 4 muestras de carbón por temperatura, 2 por corrida. Se calentó el horno de mufla a 950 °C, se pesó aproximadamente un gramo de muestra de carbón dentro de los crisoles con una balanza analítica. Estas muestras fueron previamente secadas en horno a 105 °C por 2 horas para reducir el contenido de humedad. Los crisoles con las tapas puestas se colocaron durante 2 minutos en el borde exterior del horno, sobre la tapa, luego durante 3 minutos en el borde del horno. Seguidamente se trasladaron los crisoles a la parte posterior del horno durante 6 minutos con la puerta cerrada. Concluido el tiempo se sacaron los crisoles y se dejaron enfriar en

un desecador por una hora. Una vez frías, se pesaron nuevamente y se calculó el porcentaje de volátiles mediante la ecuación 9.

$$\text{Volátiles (\%)} = \frac{\text{Peso crisol+muestra carbón(g)}-\text{Peso crisol vacío(g)}}{\text{Peso crisol + residuos (g)}} \times 100 \quad (9)$$

Determinación del poder calórico

En cuanto al poder calórico del carbón se siguió la norma estándar ASTM D5865-13 (2013) para su determinación, se utilizó un calorímetro Semimicro marca Parr modelo 6725. El procedimiento consistió en colocar una muestra de carbón de 0,0431 g en promedio dentro del reactor del reactor. La muestra se posicionó dentro de manera que estuvo en contacto con los alambres que unen dos electrodos por los que pasa corriente necesaria para llevar a cabo la ignición de combustión de la biomasa. Dentro del reactor con la muestra se liberó 3 MPa de presión de oxígeno y se introdujo en una cubeta hermética llena con 450 ml de agua. La corriente administrada por los electrodos generó el calor requerido para iniciar la combustión y el incremento de temperatura reportado por el instrumento, dato utilizado posteriormente para calcular el poder calórico de la muestra.

2.7. Caracterización química del biocarbón

Para esta caracterización se calculó el porcentaje de los principales elementos químicos del carbón (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre), mediante ensayos térmicos.

El ensayo consistió en utilizar un analizador de elementos marca Elementar CHNS modelo EL cube, este cuenta con tres columnas de adsorción específicas de gas, se colocó entre 4 y 5 mg de muestra de carbón dentro del horno y se calentó hasta los 1100 °C de temperatura. La máquina separa los gases de combustión y los cuantifica mediante un software especial, obteniendo los porcentajes de cada elemento.

2.8. Evaluación del biocarbón como tratamiento en suelos

La evaluación del carbón vegetal como tratamiento en suelos consistió en la determinación del pH, medición de conductividad y de la hidrofobicidad del carbón.

Determinación del pH y la conductividad eléctrica

Para la cuantificación de pH se vertió la muestra de carbón en frascos con 20 ml de agua destilada y se dejó en agitador por una hora, posteriormente se realizó la medición con un pH-metro marca OAKTON modelo ION 700, se evaluaron dos muestras por corridas, es decir, 4 repeticiones por temperatura.

De igual manera se realizó en las mismas muestras la medición de conductividad eléctrica con un tester de conductividad marca HANNA modelo EC-TDS °C/°F, el resultado se reportó en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Determinación de la hidrofobicidad

La hidrofobicidad corresponde a la repelencia al agua que tiene un material (Segura, 2018). Para tales pruebas se preparó en un portaobjetos de laboratorio una película fina de carbón tamizado a 106 y 90 micras (0,106 y 0,09 mm), se le colocó una gota de agua de 2 μl con ayuda de Goniómetro, este instrumento mide los ángulos formados por la gota en contacto con la superficie y de esta manera se evaluó el comportamiento del carbón ante el agua para determinar así su hidrofobicidad.

Se recolectaron datos de la variación del ángulo de la gota cada 3 segundos por 20 minutos, se realizaron 4 repeticiones por tratamiento de temperatura.

2.9. Análisis estadístico

Se realizó una Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar si la temperatura tiene efecto sobre las características evaluadas. Previamente para cada variable se verificó las pruebas de normalidad de los datos. La diferencia entre medias se determinó mediante la prueba de Tukey ($P < 0,05$). Los análisis estadísticos fueron analizados mediante software SAS (SAS Institute, Campus Drive Cary, NC).

3. RESULTADOS

3.1. Evaluación del proceso de carbonización

Variación de la temperatura en función del tiempo

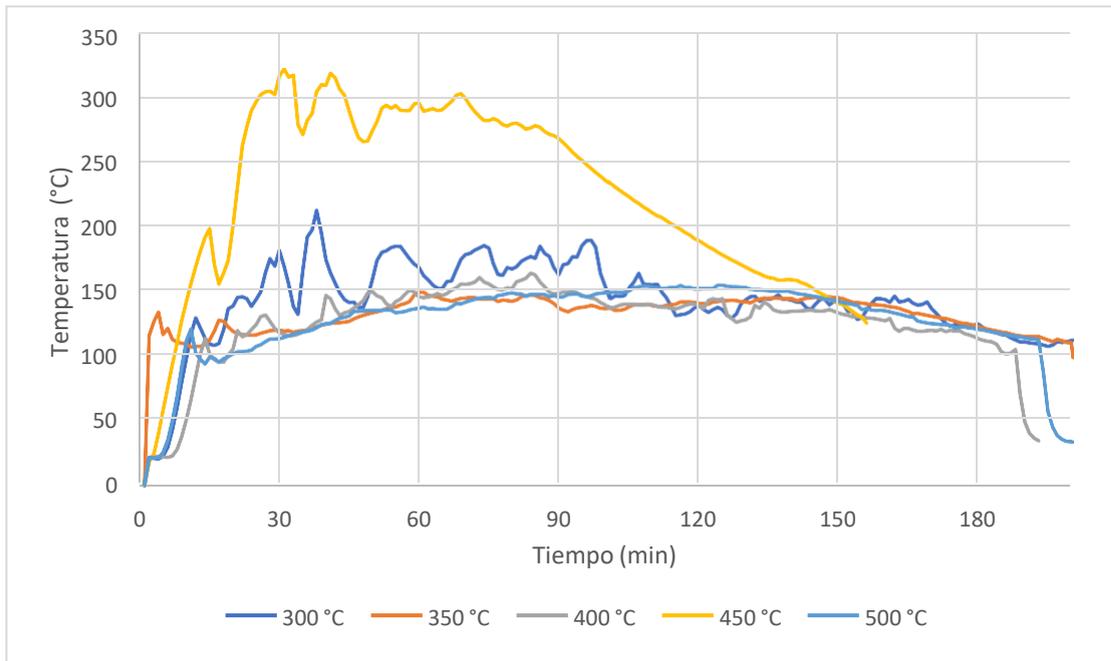
Para la evaluación del proceso de carbonización se obtuvo también la variación de la temperatura en las diferentes partes del reactor en función del tiempo, tal y como se aprecia en la figura 1. Cada proceso tardó alrededor de 2-3 horas. La figura 1a indica la variación de la temperatura dentro del reactor durante el proceso de pirólisis, se observa que la mayor variante corresponde a los 450 °C alcanzando una temperatura máxima superior a los 300 °C antes los 50 minutos de iniciado el proceso y desciende antes de las dos horas.

La figura 1b muestra el cambio de la temperatura del gas producido dentro del reactor al pasar por las válvulas de salida antes de ser condensados. En este caso todos los tratamientos de temperatura muestran un comportamiento similar variando entre los 65 y los 75 °C de temperatura aproximadamente, a excepción del tratamiento de 450 que presenta una variación de los 20 a los 80 °C en la primera hora de carbonización.

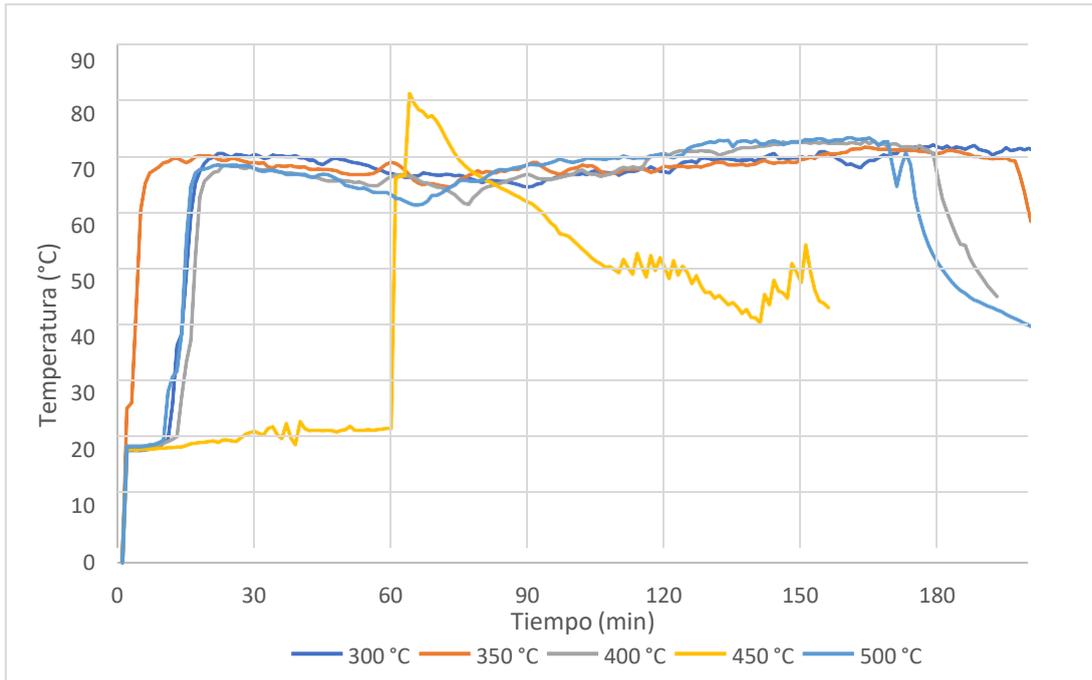
La variación de temperatura de condensación en función del tiempo se puede observar en la figura 1c correspondiente a la temperatura de los gases al pasar por el sistema de enfriamiento y condensarse para su posterior cuantificación. Se observa en la figura 2c que los tratamientos de 300, 400 y 450 °C presentan rangos entre los 20 a más de 70 °C en los primeros 50 minutos, después de una hora y media se mantiene una temperatura que varía entre los 20 y los 30 °C.

Por otro lado, los gases de los procesos a 350 y 500 °C se mantuvieron entre los 20 y los 30 °C según el gráfico, sin embargo, esto puede significar algún imprevisto en los instrumentos de medición.

(a)



(b)



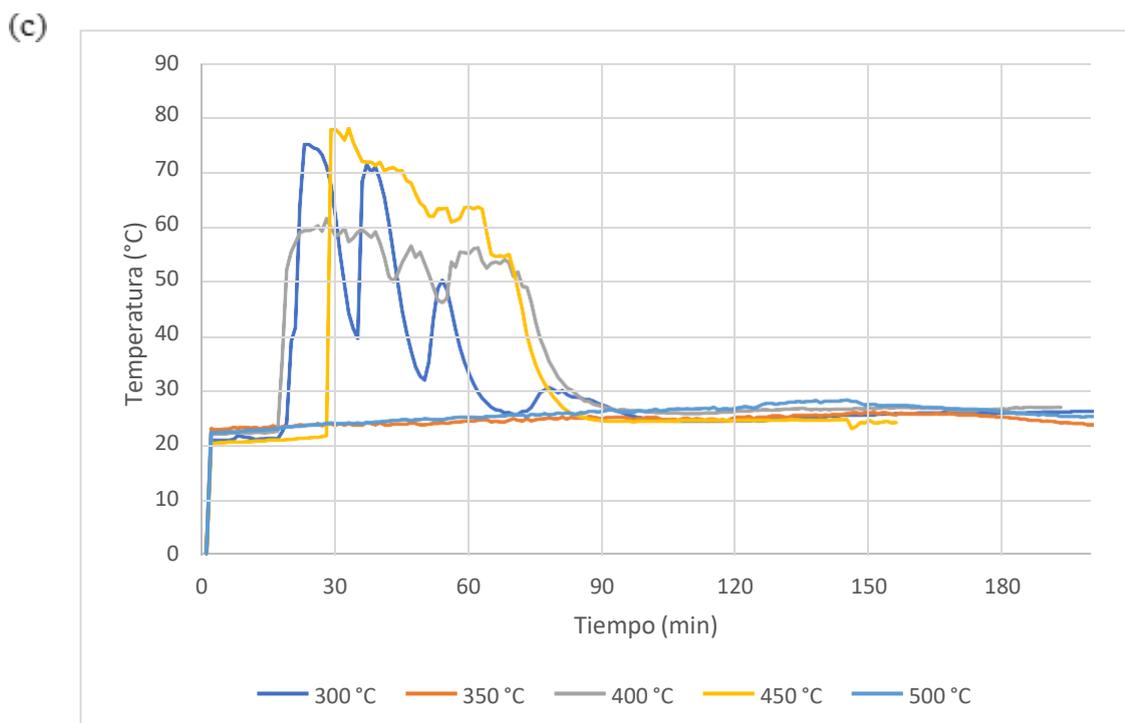


Figura 1. Variación de la temperatura con respecto al tiempo en las diferentes partes del reactor, (a) dentro del reactor, (b) salida de vapores, (c) antes de la condensación.

Rendimiento del proceso en los diferentes tipos de productos: En la figura 2 se presenta los diferentes productos de la carbonización y muestra dos observaciones por temperatura correspondientes a las dos corridas realizadas por cada tratamiento.

Rendimiento del biocarbón

En cuanto al rendimiento del carbón, se observa un descenso conforme aumenta la temperatura, esto se debe a que a una menor temperatura hay más madera sin carbonizar y el rendimiento está en función a la materia prima, por ejemplo, las muestras carbonizadas a 300 °C presentaron un promedio de 60,81 %, este porcentaje corresponde a lo que resta de madera sin carbonizar, mientras que los tratamientos de 450 °C y 500 °C fueron los que presentaron mejores rendimientos de carbonización con un promedio de madera sin carbonizar de 34,48 y 39,14 % respectivamente.

Rendimiento de los condensados y los no condensables

Los subproductos corresponden a lo que se recolectó durante la condensación de los gases producidos por el proceso de pirólisis (figura 2). Para el líquido obtenido el valor más

bajo fue para el tratamiento de 300 °C con un rendimiento del 25,77 %, el valor más alto corresponde para la carbonización a 450 °C con 37,85 %. Para las otras temperaturas los valores oscilan entre 31 y 35 %.

En cuanto al rendimiento de bioaceite recolectado los valores varían entre el 2,25 % y el 6,54 %, siendo el dato mayor para el proceso realizado a los 450 °C.

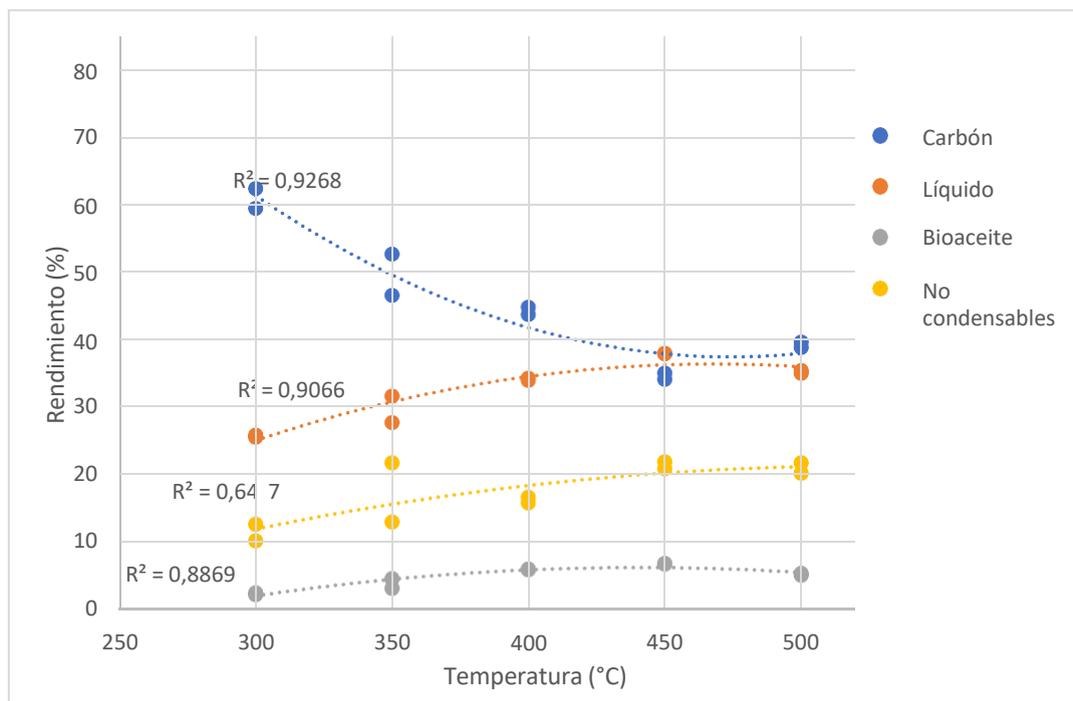


Figura 2. Evaluación del rendimiento de los productos de pirólisis de madera de Ciprés

La figura 3 muestra en fotografías el aspecto general del carbón producido a las diferentes temperaturas y del líquido que se obtuvo después del decantado de los condensados.

Para la temperatura a 300 °C se observa una carbonización incompleta, fue la temperatura que presentó más madera sin carbonizar, a los 350 °C se produjo más cantidad de carbón, sin embargo, hubo varias piezas que no se carbonizaron por completo, estas observaciones coinciden con los cálculos de rendimiento del carbón observados anteriormente.

Para los 400 °C se observan piezas más carbonizadas y con una mayor fragmentación que con las primeras temperaturas, pero se sigue observando madera. A los 450 las piezas se carbonizaron en su mayoría.

En cuanto a las muestras llevadas a una pirólisis de 500 °C se observó mayor porcentaje de carbón, no obstante, las piezas se encontraron en gran medida fragmentadas y quebradizas.

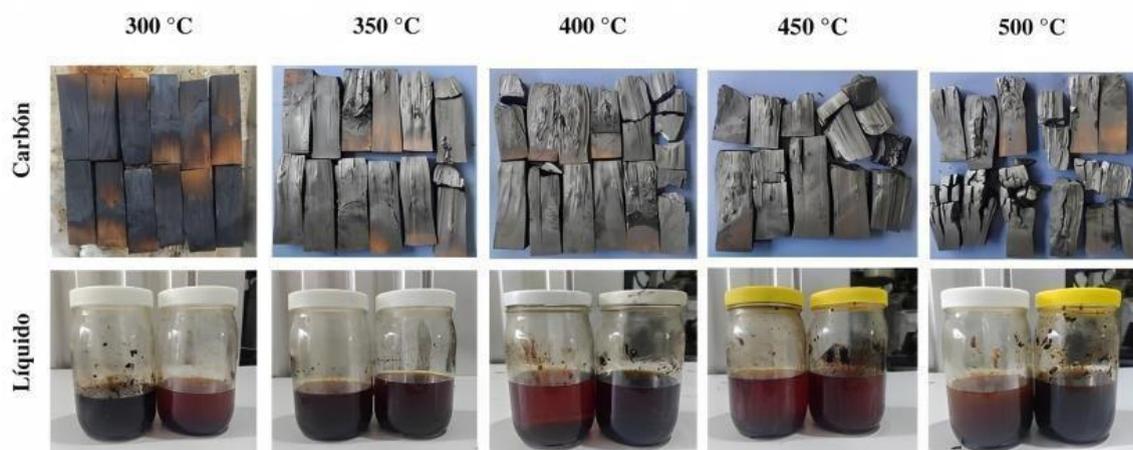


Figura 3. Aspecto general del carbón y los subproductos del proceso de pirólisis

3.2. Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas

En el cuadro 1 se presentan los resultados de la evaluación de las variables que afectan la capacidad energética del carbón. Se obtuvo que el carbón producido a los 300 °C fue el único que presentó diferencias estadísticas a los demás carbones, mientras que el carbón de 500 °C fue estadísticamente diferente solo al de 300 °C.

Para el contenido de humedad (CH) se obtuvo que el carbón a 450 °C fue el único que presentó diferencias significativas con respecto a los otros.

Es importante mencionar que el proceso de pirólisis a 450 °C se llevó a cabo antes por lo cual las condiciones del material y la carbonización varían en cuanto a los otros procesos, dando resultados de densidad y contenido de humedad que no entran en la media de los demás tratamientos de temperatura, lo que supone que el CH inicial del material era mayor que el CH inicial reportado para la materia prima en el cuadro 1.

Evaluación como bioenergía

Poder Calórico

En cuanto al poder calórico se obtuvo un incremento tomando como referencia el valor del testigo que fue de 17 308,81 kJ/kg, el valor más alto lo obtuvo el carbón producido a los 450 °C con un poder calórico igual a 34 005,94 kJ/kg, no obstante, no presentó diferencias significativas con los demás carbones a excepción del producido a 500 °C, el cual fue el valor más bajo de poder calórico, resultando ser diferente estadísticamente a las demás muestras excepto a la de 300 °C.

Cenizas y volátiles

El contenido de cenizas en la biomasa representa el residuo inorgánico que queda tras la combustión y debe ser bajo para el proceso de pirólisis (Varma et al., 2019).

En el cuadro 1 se observan las muestras en un mismo grupo B, que indica que no existen diferencias significativas entre ellas en relación con el contenido de cenizas.

En el mismo cuadro se presentan los resultados del cálculo de contenido de volátiles, donde el carbón de 450 °C mostró valores diferentes estadísticamente solo al carbón de 300 °C.

Los carbones producidos a 400 °C, 450 °C y 500 °C no presentaron diferencias significativas entre sí en cuanto al porcentaje de volátiles.

Resistencia a la compresión

En lo referente a la resistencia de compresión se observa una disminución a mayor temperatura, siendo las muestras carbonizadas a 400 °C, 450 °C y 500 °C estadísticamente similares entre ellas. Las piezas de 300 y 350 °C mostraron los resultados más altos de compresión y no existen diferencias significativas entre ambas.

Tabla 1. Características del carbón de ciprés producido a diferentes temperaturas de pirólisis

Característica	Materia prima	300 °C	350 °C	400 °C	450 °C	500 °C
Densidad	0,508 ^A (0,03)	0,240 ^B (0,10)	0,198 ^C (0,13)	0,204 ^{CD} (0,12)	0,174 ^{CE} (0,18)	0,178 ^{CDE} (0,18)
CH (%)	12,90 ^A (0,04)	2,32 ^B (0,36)	2,375 ^B (0,15)	2,211 ^B (0,14)	5,581 ^C (0,05)	2,402 ^B (0,23)
Poder calórico (kJ/kg)	17308,81 ^A (0,10)	31527,54 ^B (0,03)	31010,60 ^B (0,03)	33681,09 ^{BC} (0,04)	34005,94 ^C (0,05)	26299,88 ^{BD} (0,46)
Cenizas (%)	1,397 ^A (0,18)	0,426 ^B (0,17)	0,324 ^B (0,37)	0,333 ^B (0,18)	0,406 ^B (0,38)	0,549 ^B (0,06)
Volátiles (%)	92,22 ^A (0,002)	55,22 ^B (0,06)	46,40 ^C (0,06)	40,24 ^D (0,01)	42,17 ^{CDE} (0,06)	38,75 ^D (0,01)
Compresión (kg/cm ²)	425,24 ^A (0,08)	47,70 ^B (0,49)	32,27 ^{BC} (0,59)	23,04 ^{CD} (0,64)	15,50 ^{CD} (0,74)	9,24 ^D (1,12)

Nota: Los números entre paréntesis corresponden al coeficiente de variación para cada característica evaluada, mediante la desviación estándar de los datos reportados. Las letras en superíndice indican los resultados del análisis estadístico. Datos de variables con la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí.

3.3. Análisis termogravimétrico (TGA) y FT-IR

En la figura 4.a se presenta los resultados de los ensayos termogravimétricos aplicados a las muestras de carbón. La figura exhibe la degradación del porcentaje de masa remanente de las muestras evaluadas en función de la temperatura, se observa una mayor variación para la masa de los 300 °C y un menor cambio para la de 500 °C.

En la figura siguiente (4.b) se observa la variación de la derivada de la masa en función de la temperatura. Una curva DTG se obtiene como la primera derivada del porcentaje de pérdida de peso (wt%) frente a la temperatura (T) o el tiempo (t). De las curvas DTG se puede obtener información cuantitativa y cualitativa (Escalante et al, 2022).

La figura muestra la masa remanente en las muestras después del proceso de carbonización, se tiene que para la muestra correspondiente a los 300 °C hay un mayor porcentaje de masa remanente, lo cual indica que abajas temperaturas no se descomponen gran parte de los componentes; este porcentaje se reduce conforme aumenta la temperatura, siendo la muestra a los 500 °C la que presenta menos masa remanente.

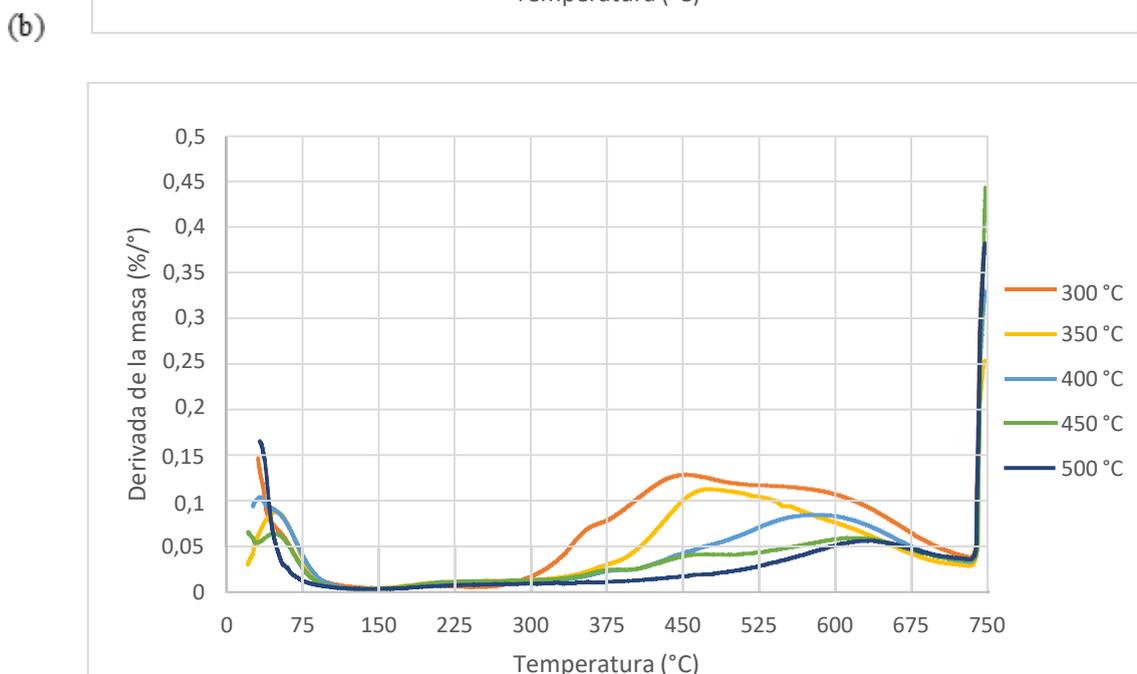
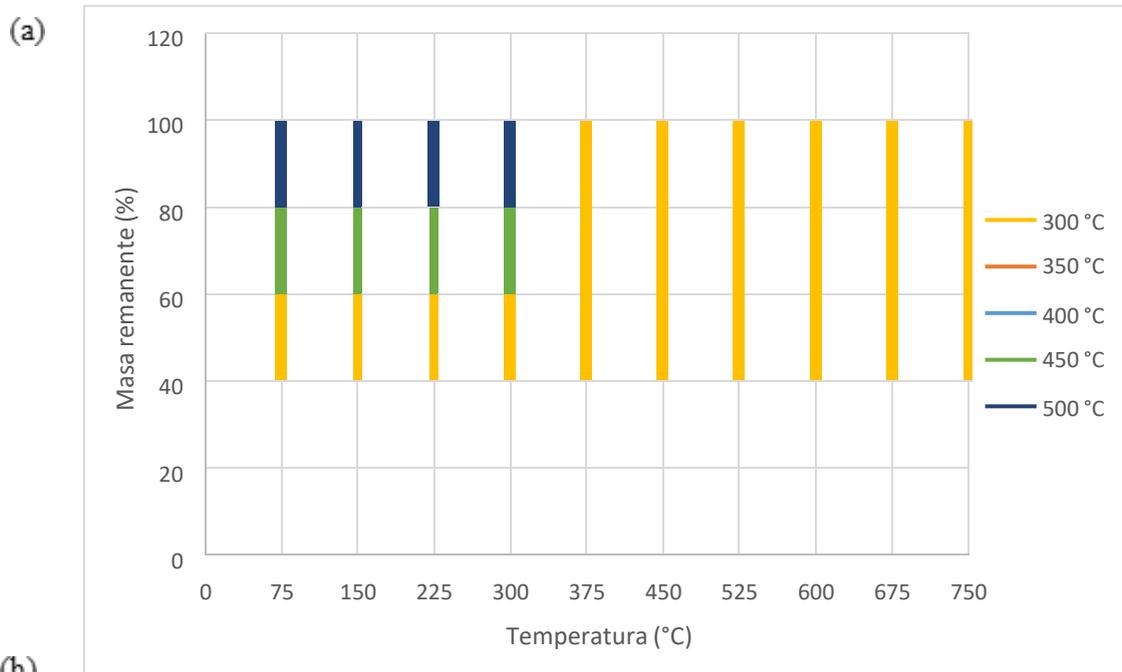


Figura 4. Análisis termogravimétrico (4a) y derivada de la masa (4b) de carbón a diferentes temperaturas.

Análisis de espectrofotometría

La figura 5 corresponde a la transmitancia en función de la longitud de onda de las muestras de carbón. El porcentaje de luz es calculado por la diferencia entre la cantidad de luz antes y después de pasar por la muestra. La figura muestra como los grupos

funcionales de los carbones cambiaron durante el proceso de pirólisis, siendo las muestras carbonizadas a 450 °C y 500 °C las que m

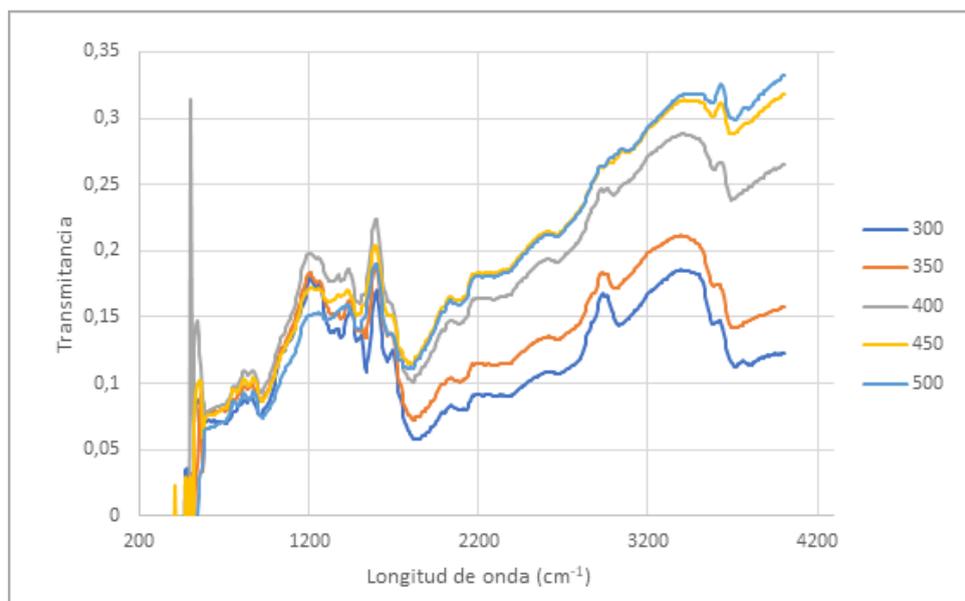


Figura 5. Espectro del carbón de ciprés formado a diferentes temperaturas de pirólisis

3.4. Propiedades químicas

El siguiente cuadro 2 expone los porcentajes obtenidos en la determinación del contenido de los elementos, donde se observa un aumento del carbono conforme aumenta la temperatura. El carbón de 500 °C fue el único estadísticamente diferente al resto, con un 85,08 % de carbono, los carbones producidos a 400 °C y 450 °C no presentaron diferencias significativas entre sí, al igual que los muestras de 300 y 350.

Para el elemento hidrógeno se tiene que el carbón a 450 presentó resultados estadísticamente similares a los carbones de 400 y 500, sin embargo, estos últimos fueron diferentes entre sí.

Para el oxígeno el resultado más bajo lo obtuvo el carbón producido a 500 °C siendo este diferente al resto. Existe una igualdad estadística entre los carbones de 400 y 450 en cuanto al oxígeno, lo mismo sucedió entre los carbones de 300 y 350.

3.5. Biocarbón como tratamiento de suelos

Evaluación de pH y conductividad eléctrica

El cuadro 2 contiene además los resultados para los parámetros de pH y conductividad eléctrica, cuyas mediciones son en efecto importantes para un cultivo agrícola de alto rendimiento. Para el pH el dato más bajo fue para el carbón a 500 °C con un pH igual a 1,00 siendo estadísticamente diferente a los otros. Los demás carbones no presentaron diferencias significativas entre sí en cuanto al pH.

En cuanto a las mediciones de conductividad eléctrica, se obtuvieron dos grupos estadísticos, donde los carbones de 350, 450 y 500 no presentan diferencias significativas. Se observa también una reducción de la relación atómica entre el carbono y el nitrógeno en todos los tratamientos. Las muestras de 400 y 450 son estadísticamente similares con respecto a la relación O/C al igual que en la relación C/N. El biocarbón de 500 fue significativamente diferente a los demás en la relación de O/C.

En la relación H/C todos los carbones presentaron resultados estadísticamente diferentes. Con respecto al rango de humectación no hay diferencias significativas entre las muestras.

Tabla 2. Evaluación de los principales elementos, conductividad, pH y rango de humectación del biocarbón de *Cupressus lusitanica* producido a cinco diferentes temperaturas de pirólisis.

	Testigo	300 °C	350 °C	400 °C	450 °C	500 °C
C (%)	48,16 ^A	72,45 ^B	74,68 ^B	78,32 ^C	80,67 ^C	85,08 ^D
H (%)	6,72 ^A	4,66 ^B	4,28 ^C	3,93 ^D	3,78 ^{DE}	3,62 ^E
O (%)	44,98 ^A	22,62 ^B	20,76 ^B	17,44 ^C	15,21 ^C	10,94 ^D
C/N	462,43 ^A	289,96 ^B	280,79 ^B	265,05 ^C	251,04 ^C	258,90 ^C
O/C	0,140 ^A	0,312 ^B	0,279 ^B	0,223 ^C	0,189 ^C	0,043 ^D
H/C	0,140 ^A	0,064 ^B	0,057 ^C	0,050 ^D	0,047 ^E	0,043 ^F
pH	-	4,19 ^A	6,50 ^A	10,50 ^A	14,50 ^A	1,00 ^B
Conductividad(μs/cm)	-	21,50 ^A	16,00 ^{AB}	21,25 ^A	13,25 ^B	14,25 ^{AB}
Rango de humectación (°/min)	-	0,819 ^A	0,804 ^A	0,836 ^A	0,841 ^A	0,491 ^A

Hidrofobicidad del material carbonizado

En la figura 6 responde al ensayo de hidrofobicidad del carbón a los diferentes tratamientos de temperatura, se observa la variación del ángulo de la gota colocada sobre la base de carbón en función del tiempo. Un ángulo mayor a los 90° demuestra un material hidrófilo, mientras que un ángulo entre 90° y 150° significa un material hidrófobo. Se obtuvo que los carbones producidos a 400 °C y 450°C son los menos hidrófobos, es decir, absorben o retienen más el agua.

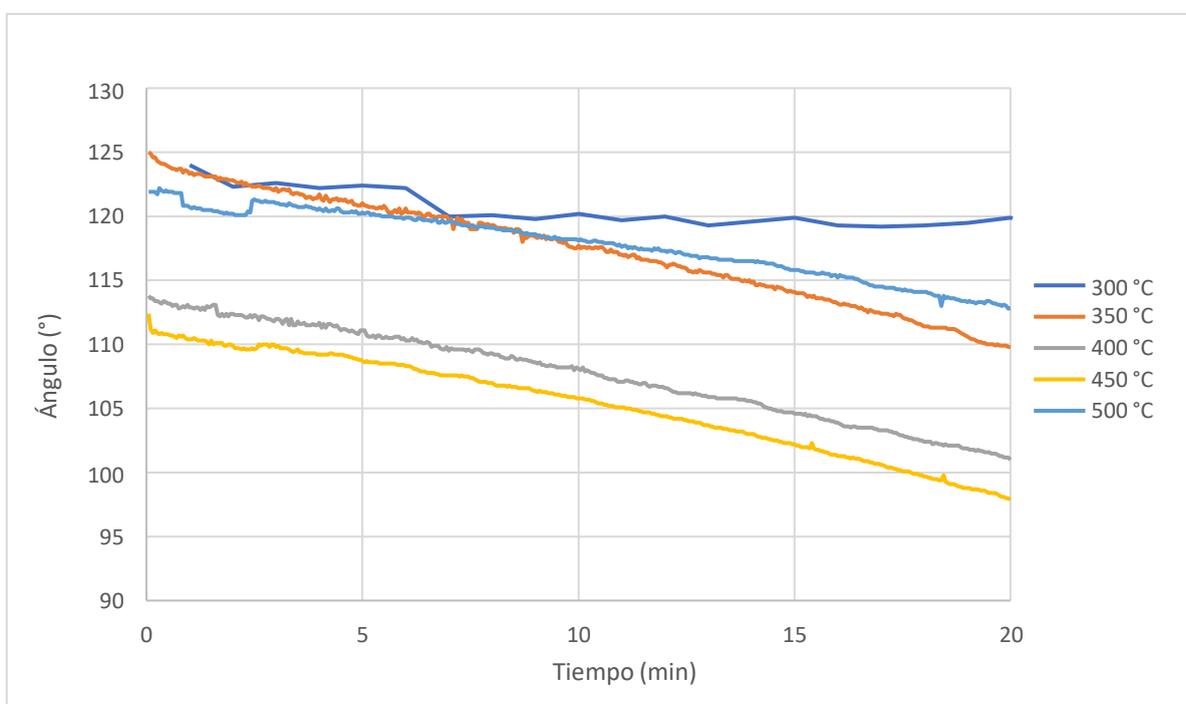


Figura 6. Variación del ángulo de contacto del carbón producido a diferentes temperaturas de pirólisis.

4. DISCUSIÓN

4.1. Evaluación del proceso de pirólisis

En la figura 1 se evidencia la relación existente entre el rendimiento y el grado de temperatura aplicada ya que a una mayor temperatura el porcentaje de rendimiento del material disminuye, sin embargo, el carbón producido a los 450 ° presentó un menor rendimiento que el de 500 °C, esto puede deberse a que al aumentar la temperatura de carbonización aumenta el contenido de carbono fijo (cuadro 2), aumento que también genera una mayor friabilidad del carbón y causa que el material se desmenuza con mayor facilidad (FAO, 1983). Con temperaturas cada vez mayores el rendimiento del carbón vegetal disminuye rápidamente, pero su composición química cambia incrementándose hasta casi el carbono puro (Chañi et al., 2017).

4.2. Evaluación de los productos

La importancia de evaluar el rendimiento del carbón radica en el requerimiento de un biocarbón con buena estabilidad térmica para las reacciones catalíticas a alta temperatura, lo que a su vez exige temperaturas de carbonización elevadas para producir biocarbón. En este sentido, también considerando la naturaleza neutra del carbono, es de gran importancia mejorar el rendimiento y la calidad del biocarbón y extraer el carbono de residuos de biomasa con la máxima eficiencia de fijación de carbono. (Wang et al., 2022).

En cuanto al rendimiento de líquidos se observa en la figura 1 que a mayor temperatura hay un incremento en la cantidad de líquido, se tiene que el mejor rendimiento fue para el proceso a los 450 °C con un 37,85 %, sin embargo, a los 500 °C ocurre un descenso en la obtención de líquido. Esto supone que a temperaturas más bajas se favorecen las reacciones primarias que conducen a la formación de vapor que luego se condensan y a altas temperaturas se favorecen las reacciones secundarias dando lugar a mayor formación de gases (Varma et al., 2019; Zhang et al., 2015). Generalmente, las limitaciones en la producción de líquidos pueden deberse tanto a una insuficiente transferencia de calor como a un sobrecalentamiento de la partícula, por lo que es necesario optimizar el proceso para obtener el rango de tamaño de partícula adecuado que permita una mayor producción de líquidos (Satzabal, A., 2021).

El color y la consistencia de los condensados depende mayormente del tipo de biomasa utilizada, estudios señalan una variación en la apariencia de los condensados recolectados de la carbonización según el tipo de biomasa, siendo unos más oscuros, otros más claros y algunos con consistencia más aceitosa (Kosakowski et al., 2020).

Se requieren partículas más pequeñas para maximizar los productos líquidos durante la pirólisis rápida. En cambio, la pirólisis intermedia no tiene un requisito de límite superior en cuanto al tamaño de las partículas, lo que permite una selección más diversa de la biomasa de alimentación (Singh et al., 2016).

En el caso de los gases no condensables se observa (figura 1) un incremento en el rendimiento a mayor temperatura, esto debido a que el CO, el CO₂ y los hidrocarburos ligeros como el CH₄ en el gas no condensable altamente mezclado son difíciles de capturar y utilizar eficazmente, lo que constituye la principal causa de pérdida de carbono en los procesos de carbonización, incluida la pirólisis rápida o la gasificación de residuos de biomasa lignocelulósica, lo que da lugar a un bajo rendimiento del biocarbón (Wang et al., 2022).

En síntesis, el tipo de pirólisis que se aplique también afecta en la obtención y el rendimiento de los productos, por ejemplo, una pirólisis rápida se utiliza para obtener mayores rendimientos de combustible líquido (bioaceite), con menores cantidades de biocarbón y productos gaseosos bajo un calentamiento rápido a altas temperaturas. En cambio, la pirólisis rápida utiliza tasas de calentamiento y temperaturas más altas, lo que supone un alto rendimiento de bioaceite (Hoang et al., 2021).

4.3. Evaluación de propiedades físicas y mecánicas

La densidad del carbón disminuye conforme aumenta la temperatura de pirólisis (cuadro 1) al igual que el contenido de humedad. Se observó la misma tendencia para el parámetro de dureza con un valor igual a 9,24 kg/cm² como el dato más bajo para la temperatura más alta, 500 °C.

Qi et al (2018) explica que esta disminución de densidad y dureza se debe a que dentro un rango de temperatura de 300-500 °C ocurre la descomposición de la celulosa, la hemicelulosa y la lignina de la biomasa en componentes volátiles más ligeros lo cual

desempeña un papel importante en la pérdida de peso, debido a la rápida pirólisis de la hemicelulosa y la celulosa.

Así como el contenido de humedad y la densidad inicial de la madera afectan directamente el rendimiento del proceso de carbonización y sus productos, Chañi et al. (2017) mencionan que el rendimiento del carbón se puede ver afectado también por las dimensiones de las piezas ya que piezas de gran tamaño requieren de mayor tiempo para ser carbonizadas y para que sus componentes sean evaporados.

4.4. Análisis termogravimétrico y FT-IR

El TGA es una técnica de análisis térmico en la que se observa la masa de una sustancia en función de la temperatura o del tiempo a medida que la muestra se somete a temperaturas y ambientes atmosféricos controlados (Carrier et al., 2011).

El proceso de pirólisis puede llevarse a cabo y estudiarse mediante TGA con la ventaja añadida de adquirir información adicional útil que puede utilizarse para observar las características del pirólisis y los comportamientos térmicos de la materia prima utilizada. Además, los datos del TGA pueden utilizarse para desarrollar parámetros cinéticos que ayuden a comprender los mecanismos de reacción. (Escalante et al, 2022).

El análisis termogravimétrico (figura 4) representa la pérdida de masa del carbón con respecto a la temperatura aplicada, este análisis se utiliza para evaluar la cantidad de hemicelulosa, celulosa y lignina presente en la biomasa. Se observa una mayor pérdida de masa para la muestra de carbón de los 300 °C. Las curvas de TGA muestran que después de los 75 °C comienza la pérdida de masa para las cinco muestras de carbón, las muestras de 300 °C y 350°C fueron las que perdieron más porcentaje de masa durante el proceso.

Estudios demuestran que la pirólisis puede ser separada en 4 etapas: en la primera etapa del TGA son removidos los componentes volátiles ligeros y la humedad contenidos en el carbón, lo cual ocurre a una temperatura menor a 120 °C. La hemicelulosa se degrada en un rango de temperatura de 220-325 °C, mientras que la lignina y la celulosa se comienzan a degradar a alrededor de los 315-400 °, y los componentes restantes de lignina se degradan a temperaturas mayores a los 450 °C (Ahmed et al., 2021; Carrier et al., 2011;

Hoang et al., 2021; Seo et al., 2020). Cuanto más alta sea la temperatura de carbonización, más vigorosa es la descomposición (Wu et al., 2015).

En la curva de DTG (figura 4b) se representa esta degradación de los componentes de la biomasa, mostrando que después de los 300 °C ocurre la degradación de la lignina para todas las muestras de carbón evaluadas, donde 300 y 350 presentaron los niveles más altos, lo cual demuestra que la pirolisis llevadas a estas temperaturas no descomponen gran parte de los componentes durante el proceso, como si sucede con temperaturas más altas como 450-500 °C, las cuales presentaron un porcentaje menor de pérdida de masa.

Análisis de espectrofotometría infrarroja (FT-IR)

Con respecto al análisis de espectrofotometría infrarroja (figura 5), este se realizó con la finalidad de evaluar las modificaciones de la estructura de la madera durante el proceso de degradación. La medición IR más conveniente del carbón vegetal es la espectroscopia de reflectancia total atenuada por transformada de Fourier (ATR-FTIR), que suele medir la absorción de las vibraciones de los grupos funcionales en la región del infrarrojo medio entre 2.500 y 15.400 nm ($4.000-650\text{ cm}^{-1}$) o en la región del infrarrojo cercano (NIR) entre 780 y 2.500 nm ($12.820-4.000\text{ cm}^{-1}$) (Constantine et al., 2021).

Los datos en la figura 5 fueron recolectados entre los $4000-300\text{ cm}^{-1}$, existe una relación directa entre la cantidad de luz reflectada y la temperatura a la cual se formó el carbón; se observa un aumento a los 3000 cm^{-1} , esta se asigna a diferentes enlaces de hidrógeno inter e intramoleculares pertenecientes a los principales componentes químicos de la madera, a partir de los 2900 cm^{-1} existe un estiramiento de CH debido a la pérdida de enlaces de hidroxilo por temperatura (Broda & Popescu, 2019).

Las bandas entre $1500\text{ y }1200\text{ cm}^{-1}$ se asignan a flexiones o estiramientos característicos de diferentes tipos de lignina. Las bandas centradas en 1463, 1425, 1375, 1160, 1111 y $1030\text{ y }1200\text{ cm}^{-1}$ se asignan a vibraciones de flexión o estiramiento características de diferentes grupos de la lignina y la celulosa. Las bandas centradas en 1739 1200 cm^{-1} , y alrededor de $1321-1317\text{ y }1200\text{ cm}^{-1}$ se asignan a vibraciones de flexión o estiramiento características de los diferentes grupos de la celulosa (Chen et al., 2010).

Los puntos altos observados (figura 5) entre los $1200\text{ y }2000\text{ cm}^{-1}$ corresponden a la degradación de hemicelulosa y celulosa de la madera, y a la conjugación de enlaces de

C=O con los anillos aromáticos entre 1600-1630 cm^{-1} (Balaguer, et al.,2021). La intensa banda que se encuentra en 1700 cm^{-1} está relacionada con C=O que surge de los ácidos carboxílicos que se atribuyen a la hemicelulosa cuya degradación es evidente con la pirólisis, lo que se asocia con la reducción de las bandas para las muestras de carbón (Usman et al.,2015).

Usman et al. (2015) señalan que la aparición del tramo C-H (2855-2920 cm^{-1}) sugiere la presencia de hemicelulosa y celulosa que se reducen con el aumento de la temperatura, lo que plantea la eliminación de los grupos funcionales polares de los biocarbones.

4.5. Evaluación energética

El tipo de proceso de producción de biocarbón y sus condiciones afectan a la calidad del producto. Los parámetros de calidad medibles incluyen la composición elemental, el contenido de cenizas, la densidad aparente, la porosidad, los grupos funcionales de la superficie o las propiedades de absorción (Samoraj et al., 2022).

Se observa además un incremento del poder calórico a mayor temperatura de pirólisis en cuanto al valor inicial de la materia prima. El material carbonizado a 450 °C de temperatura presentó el valor más alto de poder calórico siendo este igual a 34 005,94 kJ/kg. El carbón vegetal tiene mayor contenido de carbono que la madera por lo que su poder calórico es mayor y es mejor combustible que esta. El contenido de carbón depende principalmente de las condiciones de carbonización y en un menor grado de la cantidad de carbono que contiene la carga original de la madera (Qin et al., 2022).

El poder calórico está también relacionado con el contenido de cenizas que presenta el carbón, ya que a un menor contenido de cenizas hay un mayor poder calórico y mejores condiciones de combustión. A medida que aumenta la temperatura de pirólisis y disminuye el rendimiento del carbón, el contenido de cenizas minerales se vuelve más concentrado (Wang et al., 2022; Qin et al., 2022). La composición del material influye en el contenido de cenizas, así como la velocidad y la temperatura aplicada, la presencia de tierra, suciedad u otros componentes contaminantes ya que pueden contribuir en su incremento (Mencarelli et al., 2022).

Con respecto al material volátil se observa una disminución a mayor temperatura de pirolisis, siendo 38,75 % el porcentaje más bajo correspondiente al carbón producido a

los 500 °C. Un alto contenido de volátiles indica que el proceso de carbonización fue heterogéneo y se ejecutó a temperaturas bajas, por ende, los alquitranes no se volatizaron durante el proceso y serán liberados cuando se lleve a cabo la combustión del carbón (Carrillo et al., 2013).

El contenido de volátiles está relacionado con el proceso de carbonización, puesto que si se lleva la madera a un pirolisis lenta y alta temperatura se eliminan la mayoría de las sustancias volátiles dando como resultado un carbón con mayor contenido de carbono fijo y por lo tanto tendrá una mejor combustión. Sucede lo contrario cuando se realiza una carbonización rápida a bajas temperaturas, mayor porcentaje de volátiles, menor contenido de carbono fijo. Como es el caso de los carbones producidos a 300 °C y 350 °C, que presentaron los valores más altos de material volátil con 55,22 % y 46,40 % respectivamente.

4.6. Caracterización química del biocarbón

La principal composición elemental del biocarbón es el carbono, el oxígeno, el nitrógeno y el material inorgánico incombustible llamado ceniza. Dependiendo de los parámetros de funcionamiento de la pirólisis (temperatura y tiempo) y de las materias primas, el contenido de carbono del biocarbón varía entre el 30% y el 60% (Seow et al., 2022). El carbono es el elemento más básico e importante, su contenido es por lo general el más alto de todos los elementos. En cuanto al hidrógeno, aunque su contenido es bajo generalmente entre 1-6% (cuadro 2), constituye importantes componentes activos en el carbón de biomasa lignocelulósica. En cuanto al elemento O, está implicado en la formación de casi todos los grupos funcionales en la superficie del biocarbón incluyendo el grupo hidroxilo, el epoxi, el carboxilo, el acilo, el carbonilo, el éter, el éster y el grupo sulfónico, y juega un papel importante en los comportamientos de reacción química del biocarbón (Qin et al., 2022).

Estudios señalan que el oxígeno de la biomasa lignocelulósica se libera más rápidamente que el carbono durante el proceso de carbonización. Se puede ver que la pérdida de carbono se produce siempre combinada con el oxígeno y el hidrógeno inherentes a la biomasa, lo que conduce a la formación de oxigenados (Barskov et al., 2019).

Los resultados de la determinación elemental de las muestras (cuadro 2) indican un aumento del carbono directo con la temperatura. Diversos estudios demuestran que el

aumento de la temperatura de pirólisis facilita la producción de biocarbón más recalcitrante y con menor liberación de carbono al aplicarlo al suelo, lo que favorece el secuestro de carbono (Nan et al., 2022). El hidrógeno y el oxígeno, sin embargo, disminuyen a conforme incrementa la temperatura (Ma et al., 2022).

La composición de C, H y O las proporciones de H/C y O/C se utilizan a menudo como indicadores de evaluación de las características y estructuras particulares del carbón de origen lignocelulósico, como la aromaticidad y la funcionalidad (Qin et al., 2022).

En el cuadro 2 se presentan los valores obtenidos para estas relaciones, con C/N= 289,96 % como el más alto para la muestra de carbonización a 300 °C y la más baja para 500 °C con 258,90. La relación molar entre O/C debe ser menor que 0,4 y la de H/C debe ser menos que 0,7, ambas son características importantes que dependen del proceso de carbonización aplicada y el tipo de biomasa (Schmidt et al., 2016). El dato más bajo en ambas relaciones lo obtuvo la muestra de 500, con un 0,043 tanto en la relación de O/C como la de H/C, de igual manera, las demás muestras de carbón se encuentran dentro del rango considerado ideal.

4.7. Evaluación como enmiendas de suelos

Para la evaluación de fertilizantes se tomó en cuenta los contenidos de los principales elementos en la biomasa. El biocarbón puede añadirse al suelo para mejorar sus propiedades fisicoquímicas y biológicas, afectando positivamente a su calidad y productividad. También puede ser una fuente de nutrientes para las plantas, puesto que los minerales del suelo interactúan con el biocarbón suprimiendo la desintegración física, la oxidación abiótica y la mineralización biótica (Samoraj et al., 2022; Varma et al, 2019).

En la evaluación del carbón como tratamiento de suelos (cuadro 2) se evidencia que a mayor temperatura el pH es alcalino, a diferencia del carbón a 500 °C donde el pH es ácido, esto puede deberse a las reacciones secundarias como se explicó anteriormente. Con tales resultados, se considera que el carbón producido a una temperatura de 450 °C presenta las mejores características para ser aplicado como enmiendas de suelo.

Con respecto a la hidrofobicidad del carbón se concluye que el material presenta un comportamiento mayormente hidrófobo al aumentar la temperatura de pirólisis. La química de la superficie del biocarbón depende en gran medida de la materia prima de la

biomasa y de las condiciones de pirólisis (temperatura, tiempo y velocidad de calentamiento), dando lugar a diferentes propiedades hidrofílicas, hidrofóbicas, ácidas y alcalinas (Seow et al., 2022).

El aumento de las temperaturas de pirólisis también aumenta la aromaticidad y disminuye la polaridad del biocarbón, por lo que la superficie del biocarbón se vuelve menos hidrofílica. Se ha informado de un menor contenido de O y H al aumentar la temperatura de pirólisis debido a la pérdida de grupos funcionales en la superficie (Sizmur et al., 2017). No obstante, a una temperatura mayor a los 450 °C se observa un cambio en la condición hidrófoba del carbón, Segura (2018) explica que esto se asocia a los poros revestidos por grupos funcionales que no fueron eliminados durante la combustión, lo que impide la filtración del agua al generar fuerzas capilares negativas, pero conforme avanza el tiempo los poros permiten el paso del agua debido a que el revestimiento es degradable con el agua.

Actualmente se realizan estudios enfocados en la valoración de biocarbón como enmiendas de suelos en cultivos agrícolas, así como en tratamientos de aguas residuales (Marín Velásquez et al., 2019; Nawaz & Kumar, 2022; Pereira Lopes & Astruc, 2021). En un estudio realizado por Becerra-Agudelo et al. (2022) se concluye que la aplicación de carbón de origen vegetal aumento el pH, capacidad que se le atribuye a la concentración de cationes básicos, a los abundantes grupos funcionales orgánicos en la superficie de los carbones y a la capacidad de consumo de protones.

5. CONCLUSIONES

Las propiedades fisicoquímicas del carbón variaron según la temperatura a la que fue producido. Se presentó un aumento del potencial energético conforme un aumento de temperatura y se produce una disminución en el contenido de cenizas.

El rendimiento del bioaceite aumentó con la temperatura hasta los 450 °C debido a la descomposición primaria de los componentes de la materia prima, no obstante, a una temperatura mayor el rendimiento fue más bajo causado principalmente por las reacciones secundarias en las que el carbón experimenta una descomposición secundaria, lo que afecta el rendimiento tanto del biocarbón como de los productos gaseosos. Los volátiles también disminuyen a mayor temperatura, los elementos de H, O y N son removidos, lo que contribuye al aumento de carbono a medida que aumenta la temperatura.

Se concluye que la mejor temperatura de pirólisis para carbonizar madera de ciprés es a 450 °C ya que fue el tratamiento que presentó los mejores resultados en cuanto a las propiedades evaluadas: un poder calórico alto para poder aprovecharse como bioenergía, así como valores óptimos de contenidos de cenizas y volátiles. Además, presentó datos apropiados para utilizarse como enmiendas de suelos, como un alto porcentaje de carbono fijo, la alcalinidad del biocarbón sugiere su capacidad productiva para ser aplicado en suelos y mejorar su condición, asimismo, la adición de un biocarbón hidrófobo al suelo puede incrementar la disponibilidad de agua en sitios donde es escaza.

6. RECOMENDACIONES

Las condiciones de carbonización influyen directamente en las características del carbón obtenido, por lo que se recomienda para futuras investigaciones considerar la aplicación de tratamientos previos al proceso de pirólisis, por ejemplo, estudios demuestran que el uso de ácido sulfúrico concentrado funciona como pretratamiento, puesto que puede extraer rápidamente elementos de H y O y así disminuir la pérdida de carbono durante el proceso de carbonización, mejorando así su rendimiento (Wang et al, 2022).

Otra manera de incrementar el rendimiento es el utilizar piezas de materia prima de menor tamaño, para tener un material carbonizado más uniforme y aparte reducir el tiempo de producción. Asimismo, se recomienda utilizar otro tipo de métodos para producir

biocarbón, como la carbonización hidrotermal (Simsir et al., 2017) en la que no se necesita un pretratamiento de secado y la biomasa se calienta a temperaturas más bajas (180-320 °C), sin embargo, se obtiene un carbón con alto rendimiento energético y que puede ser utilizado en el secuestro de carbón, mejora del suelo y en el tratamiento de aguas residuales.

7. REFERENCIAS

Ashfaq Ahmed, Syarif Hidayat, Muhammad S. Abu Bakar, Abul K. Azad, Rahayu S. Sukri & Neeranuch Phusunti (2021) Thermochemical characterization of *Acacia auriculiformis* tree parts via proximate, ultimate, TGA, DTG, calorific value and FTIR spectroscopy analyses to evaluate their potential as a biofuel resource, *Biofuels*, 12:1, 9-20, DOI: <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1442663>

ASTM International. ASTM D1762-84 (2013). Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. West Conshohocken, PA; ASTM International
DOI: 10.1520/D1762-84R13

ASTM International. ASTM D5865-13 (2013). Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. West Conshohocken, PA; ASTM International.
doi: doi.org/10.1520/D5865-13

Ajith Kumar, J., Vinoth Kumar, K., Petchimuthu, M., Iyahraja, S., & Vignesh Kumar, D. (2021). Comparative analysis of briquettes obtained from biomass and charcoal. *Materials Today: Proceedings*, 45, 857-861. 10.1016/j.matpr.2020.02.918

Balaguer-Benlliure, V. (2019). Evaluación del proceso de carbonización y las características del biochar de 16 especies creciendo en plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. (Tesis de Licenciatura.) Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

Balaguer-Benlliure, V., Moya, R., & Gaitán-Alvarez, J. (2021). Physical and Energy Characteristics, Compression Strength, and Chemical Modification of Charcoal Produced from Sixteen Tropical Woods in Costa Rica. *Journal of Sustainable Forestry*, 1-19. 10.1080/10549811.2021.1978096

Barskov, S., Zappi, M., Buchireddy, P., Dufreche, S., Guillory, J., Gang, D., Hernandez, R., Bajpai, R., Baudier, J., Cooper, R., & Sharp, R. (2019). Torrefaction of biomass: A review of production methods for biocoal from cultured and waste lignocellulosic feedstocks. *Renewable Energy*, *142*, 624-642. 10.1016/j.renene.2019.04.068

Becerra-Agudelo, E., López, J. E., Betancur-García, H., Carbal-Guerra, J., Torres-Hernández, M., & Saldarriaga, J. F. (2022). Assessment of the application of two amendments (lime and biochar) on the acidification and bioavailability of Ni in a Ni-contaminated agricultural soils of northern Colombia. *Heliyon*, *8*(8), e10221. 10.1016/j.heliyon.2022.e10221

Broda, M., & Popescu, C. (2019). Natural decay of archaeological oak wood versus artificial degradation processes — An FT-IR spectroscopy and X-ray diffraction study. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *209*, 280-287. 10.1016/j.saa.2018.10.057

Cai, J., Xu, D., Dong, Z., Yu, X., Yang, Y., Banks, S. W., & Bridgwater, A. V. (2018). Processing thermogravimetric analysis data for isoconversional kinetic analysis of lignocellulosic biomass pyrolysis: Case study of corn stalk. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 2705-2715. 10.1016/j.rser.2017.09.113

Carrier, M., Loppinet-Serani, A., Denux, D., Lasnier, J., Ham-Pichavant, F., Cansell, F., & Aymonier, C. (2011). Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass. *Biomass and Bioenergy*, *35*(1), 298-307. 10.1016/j.biombioe.2010.08.067

Carrillo, A. Foroughbakhch, R. y Bustamante V. (2013). Calidad del carbón de *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. y *Ebenopsis ebano*

(Berland.) Barneby & J.W. Grimes elaborado en horno tipo fosa, Revista de Ciencias Forestales. Vol. 4 Núm. 17 – México. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v4n17/v4n17a7.pdf>

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). (2018). Producción de Carbón Vegetal en la Estrella de El Guarco. Cartago, Costa Rica.

Chañi, Y & Rengifo, J. (2017). Evaluación *del rendimiento y calidad del carbón vegetal, a partir de residuos de la especie Dypterix odorata (aublet) willd (shihuahuaco), producidos en horno artesanal de aserrín tipo horizontal, Tambopata-madre de Dios*

Chen, H., Ferrari, C., Angiuli, M., Yao, J., Raspi, C., & Bramanti, E. (2010). Qualitative and quantitative analysis of wood samples by Fourier transform infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Carbohydrate Polymers*, 82(3), 772-778. 10.1016/j.carbpol.2010.05.052

Constantine, M., Mooney, S., Hibbert, B., Marjo, C., Bird, M., Cohen, T., Forbes, M., McBeath, A., Rich, A., & Stride, J. (2021). Using charcoal, ATR FTIR and chemometrics to model the intensity of pyrolysis: Exploratory steps towards characterising fire events. *Science of the Total Environment*, 783, 147052. 10.1016/j.scitotenv.2021.147052

Escalante, J., Chen, W., Tabatabaei, M., Hoang, A. T., Kwon, E. E., Andrew Lin, K., & Saravanakumar, A. (2022). Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112914. 10.1016/j.rser.2022.112914

FAO (1983). Métodos Simples para fabricar carbón. Estudios Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación (FAO), Montes- Pag 41, 154 <https://www.fao.org/3/x5328s/x5328s00.htm>

Gosling, W. D., Cornelissen, H. L., & McMichael, C. N. H. (2019). Reconstructing past fire temperatures from ancient charcoal material. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 520, 128-137. 10.1016/j.palaeo.2019.01.029

Hoang, A. T., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Chong, C. T., Cheng, C. K., Sakthivel, R., & Ok, Y. S. (2021). Progress on the lignocellulosic biomass pyrolysis for biofuel production toward environmental sustainability. *Fuel Processing Technology*, 223, 106997. 10.1016/j.fuproc.2021.106997

Kosakowski, W., Bryszewska, M. A., & Dziugan, P. (2020). *Biochars from Post-Production Biomass and Waste from Wood Management: Analysis of Carbonization Products*. MDPI AG. 10.3390/ma13214971

Ma, B., Zhu, J., Sun, B., Chen, C., & Sun, D. (2022). Influence of pyrolysis temperature on characteristics and Cr (VI) adsorption performance of carbonaceous nanofibers derived from bacterial cellulose. *Chemosphere*, 291, 132976. 10.1016/j.chemosphere.2021.132976

Marín Velásquez, T. D., Heredia-Jiménez, V. I., & Alcarraz-Curi, M. (2019). *Filtro de cascarilla de Ricinus communis y carbón vegetal para tratamiento de agua contaminada con hidrocarburos: diseño de un sistema en serie por etapas*. Universitat Politècnica de Valencia. 10.4995/ia.2019.11426

Mencarelli, A., Cavalli, R., & Greco, R. (2022). Variability on the energy properties of charcoal and charcoal briquettes for barbecue. *Heliyon*, 8(8), e10052. 10.1016/j.heliyon.2022.e10052

Moya, R.; Tenorio, C. (2013). Características de combustibilidad de diez especies de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú (Costa Rica)*, 10 (24), pág. 26-33.

Nan, H., Mašek, O., Yang, F., Xu, X., Qiu, H., Cao, X., & Zhao, L. (2022). Minerals: A missing role for enhanced biochar carbon sequestration from the thermal conversion of biomass to the application in soil. *Earth-Science Reviews*, 234, 104215. 10.1016/j.earscirev.2022.104215

Nawaz, A., & Kumar, P. (2022). Elucidating the bioenergy potential of raw, hydrothermally carbonized and torrefied waste *Arundo donax* biomass in terms of physicochemical characterization, kinetic and thermodynamic parameters. *Renewable Energy*, 187, 844-856. [https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.renene.2022.01.102](https://doi.org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.renene.2022.01.102)

Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812-1836. 10.1016/j.soilbio.2011.04.022

Pereira Lopes, R., & Astruc, D. (2021). Biochar as a support for nanocatalysts and other reagents: Recent advances and applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 426, 213585. 10.1016/j.ccr.2020.213585

Qi, J., Zhao, J., Xu, Y., Wang, Y., & Han, K. (2018). Segmented heating carbonization of biomass: Yields, property and estimation of heating value of

Qin, F., Zhang, C., Zeng, G., Huang, D., Tan, X., & Duan, A. (2022). Lignocellulosic biomass carbonization for biochar production and characterization of biochar reactivity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112056. <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.rser.2021.112056>

Quesada-Kimsey, J. (2012). La carbonización de residuos biomásicos: una exploración con perspectivas emocionantes. *Revista Tecnología En Marcha*, 25(5), pág. 14–21. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v25i5.465>

Samoraj, M., Mironiuk, M., Witek-Krowiak, A., Izydorczyk, G., Skrzypczak, D., Mikula, K., Baśladyńska, S., Moustakas, K., & Chojnacka, K. (2022). Biochar in environmental friendly fertilizers - Prospects of development products and technologies. *Chemosphere*, 296, 133975. 10.1016/j.chemosphere.2022.133975

Sakhiya, A.K., Anand, A., Kaushal, P., (2020). Production, activation, and applications of biochar in recent times. *Biochar*. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00047-1>

Schmidt, et al. (2016). European Biochar Certificate - Guidelines for a sustainable production of Biochar. Arbaz (CH): European Biochar Foundation (EBC). DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4658.7043>

Segura, D. (2018). Control de calidad de biocarbón para la producción de Terra Presta. Escuela de Química, Ingeniería Ambiental. <https://hdl.handle.net/2238/10315>

Seo, M. W., Jeong, H. M., Lee, W. J., Yoon, S. J., Ra, H. W., Kim, Y. K., Lee, D., Han, S. W., Kim, S. D., Lee, J. G., & Jeong, S. M. (2020). Carbonization characteristics of biomass/coking coal blends for the application of bio-coke. *Chemical Engineering Journal*, 394, 124943. 10.1016/j.cej.2020.124943

Seow, Y. X., Tan, Y. H., Mubarak, N. M., Kandedo, J., Khalid, M., Ibrahim, M. L., & Ghasemi, M. (2022). A review on biochar production from different biomass wastes by recent carbonization technologies and its sustainable applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *10*(1), 107017. 10.1016/j.jece.2021.107017

Simsir, H., Eltugral, N., & Karagoz, S. (2017). Hydrothermal carbonization for the preparation of hydrochars from glucose, cellulose, chitin, chitosan and wood chips via low-temperature and their characterization. *Bioresource Technology*, *246*, 82-87. <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.biortech.2017.07.018>

Singh, R., Krishna, B. B., Mishra, G., Kumar, J., & Bhaskar, T. (2016). Strategies for selection of thermo-chemical processes for the valorisation of biomass. *Renewable Energy*, *98*, 226-237. 10.1016/j.renene.2016.03.023

Sizmur, T., Fresno, T., Akgül, G., Frost, H., & Moreno-Jiménez, E. (2017). Biochar modification to enhance sorption of inorganics from water. *Bioresource Technology*, *246*, 34-47. 10.1016/j.biortech.2017.07.082

Usman, A. R. A., Abduljabbar, A., Vithanage, M., Ok, Y. S., Ahmad, M., Ahmad, M., Elfaki, J., Abdulazeem, S. S., & Al-Wabel, M. I. (2015). Biochar production from date palm waste: Charring temperature induced changes in composition and surface chemistry. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *115*, 392-400. 10.1016/j.jaap.2015.08.016

Varma, A. K., Thakur, L. S., Shankar, R., & Mondal, P. (2019). Pyrolysis of wood sawdust: Effects of process parameters on products yield and characterization of products. *Waste Management*, *89*, 224-235. 10.1016/j.wasman.2019.04.016

Wang, C., Zou, R., Qian, M., Kong, X., Huo, E., Lin, X., Wang, L., Zhang, X., Ruan, R., & Lei, H. (2022). Improvement of the carbon yield from biomass carbonization through sulfuric acid pre-dehydration at room temperature. *Bioresource Technology*, 355, 127251. <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.biortech.2022.127251>

Wu, Q., Zhang, S., Hou, B., Zheng, H., Deng, W., Liu, D., & Tang, W. (2015). Study on the preparation of wood vinegar from biomass residues by carbonization process. *Bioresource Technology*, 179, 98-103. 10.1016/j.biortech.2014.12.026

Zhang, J., Liu, J., & Liu, R. (2015). Effects of pyrolysis temperature and heating time on biochar obtained from the pyrolysis of straw and lignosulfonate. *Bioresource Technology*, 176, 288-291. 10.1016/j.biortech.2014.11.011

Zhao, J., Liu, C., Hou, T., Lei, Z., Yuan, T., Shimizu, K., & Zhang, Z. (2022). Conversion of biomass waste to solid fuel via hydrothermal co-carbonization of distillers grains and sewage sludge. *Bioresource Technology*, 345, 126545. <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1016/j.biortech.2021.126545>