

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL CARBÓN VEGETAL DE
CINCO ESPECIES ARBÓREAS UTILIZADAS EN SISTEMAS
AGROFORESTALES CON CAFÉ EN COMPARACIÓN CON
EL *QUERCUS COSTARICENSIS*, COSTA RICA

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON EL GRADO
ACADÉMICO DE LICENCIATURA

NAT-YEL YASIR SÁENZ SABORÍO

CARTAGO, COSTA RICA, 2023

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL CARBÓN VEGETAL DE
CINCO ESPECIES ARBÓREAS UTILIZADAS EN SISTEMAS
AGROFORESTALES CON CAFÉ EN COMPARACIÓN CON
EL *QUERCUS COSTARICENSIS*, COSTA RICA

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERÍA FORESTAL CON EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIATURA

NAT-YEL YASIR SÁENZ SABORÍO

CARTAGO, COSTA RICA, 2023

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL CARBÓN VEGETAL DE CINCO ESPECIES ARBÓREAS UTILIZADAS EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ EN COMPARACIÓN CON EL *QUERCUS COSTARICENSIS*, COSTA RICA

Nat-yel Yasir Sáenz Saborío

RESUMEN

El presente estudio evaluó la calidad del carbón vegetal de cinco especies utilizadas en sistemas agroforestales con café, comparándolas con la especie de *Quercus costaricensis* que tradicionalmente era usado para producir carbón en Costa Rica.

La materia prima utilizada fueron las podas (ramas) de la *Erythina poeppigiana* (Poró gigante), *Eucalyptus deglupta* (Eucalipto), *Persea americana* (Aguacate), *Grevillea robusta* (Gravilia), e *Inga edulis* (Guaba chilillo). El material fue cortado e introducido en un reactor con 3 litros de capacidad para la elaboración del carbón, donde por medio de la pirólisis a una temperatura de 450°C. Se evaluó el rendimiento de los productos de la pirólisis (carbón, licor de madera, bio-aceite y gases no condensables), además se evaluó las propiedades del carbón de contenido de humedad, la densidad, la resistencia a la compresión, el porcentaje de cenizas y volátiles, el poder calorífico, los cambios químicos por espectroscopía infrarroja (FT-IR), pH, conductividad eléctrica e hidrofobicidad del carbón.

El Poró presentó los más altos valores en el contenido de humedad, cenizas, volátiles, pH y conductividad eléctrica con 6,67%, 9,87%, 84%, 10, 3385 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. En el caso de la resistencia a la compresión, el valor más alto se presentó en el carbón de Quercus y en la hidrofobicidad, el Aguacate presentó un resultado alto de hidrofobicidad. El Quercus presentó diferencias significativas en cuanto a la resistencia a la compresión, bajos contenido de volátiles, bajo porcentaje de cenizas y un bajo pH con respecto a las especies de SAF. Mientras que en el Quercus presentó bajas diferencias significativas con respecto con la Gravilia y Poró en las pruebas de conductividad eléctrica.

Se establece que las especies de SAF cumplen con los estándares internacionales del mercado como fuente de energía, a excepción del Poró y que además podrían ser utilizadas como enmiendas para el suelo.

Palabras claves: Sistemas agroforestales, *Quercus costaricensis*, Pirólisis, Biocarbón, Enmiendas.

EVALUATION OF CHARCOAL QUALITY OF FIVE TREE SPECIES USED IN AGROFORESTRY SYSTEMS WITH COFFEE COMPARED TO QUERCUS COSTARICENSIS, COSTA RICA

Nat-yel Yasir Sáenz Saborío

Abstract

The present study evaluated the charcoal quality of five species used in agroforestry systems with coffee, comparing them with the species of *Quercus costaricensis* that was traditionally used to produce charcoal in Costa Rica.

The raw material used was the pruning (branches) of *Erythina poeppigiana* (Poró gigante), *Eucalyptus deglupta* (Eucalipto), *Persea americana* (Aguacate), *Grevillea robusta* (Gravilia), e *Inga edulis* (Guaba chilillo). The material was cut and introduced into a reactor with a capacity of 3 liters for the production of charcoal, where it was used by pyrolysis at a temperature of 450 °C. The performance of the pyrolysis products (coal, wood liquor, bio-oil and non-condensable gases) was evaluated, in addition to the properties of the charcoal, moisture content, density, compressive strength, percentage of ash and volatiles, calorific value, chemical changes by infrared spectroscopy (FTIR), pH, electrical conductivity and hydrophobicity of charcoal were evaluated. The Poró presented the highest values in moisture content, ash, volatile, pH and electrical conductivity with 6,67%, 9,87%, 84%, 10, 3385 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectively. In the case of compressive strength, the highest value was Quercus charcoal and in hydrophobicity, Avocado presented a high result of hydrophobicity. Quercus showed significant differences in compressive strength, low volatile content, low ash and low pH of all SAF species. On the other hand, Quercus showed low significant differences with respect to Gravilia and Poró, in electrical conductivity tests.

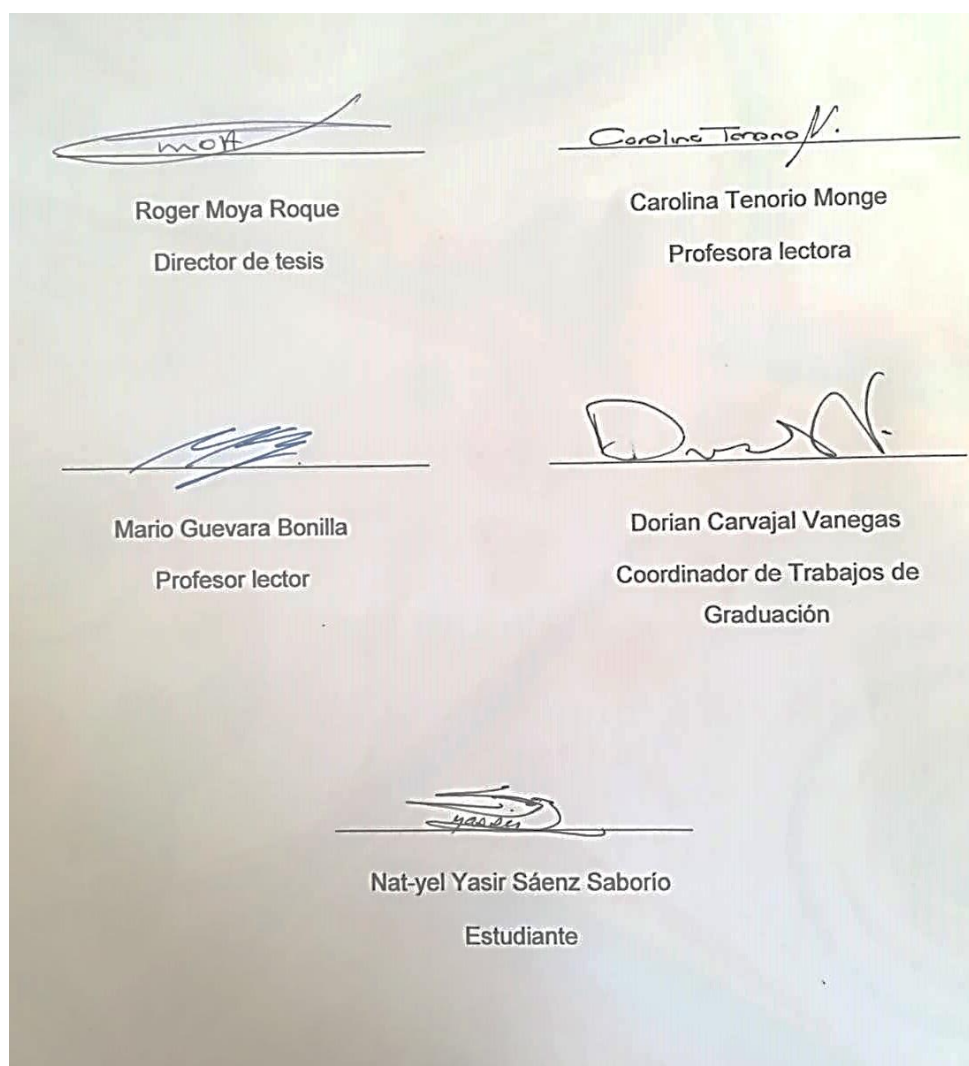
It is established that the SAF species comply with international market standards as energy source, with the exception of the Poró and that they could also be used as soil amendments.

Keywords: Agroforestry systems, *Quercus costaricensis*, Pyrolysis, Biochar, Amendments.

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL CARBÓN VEGETAL DE CINCO ESPECIES ARBÓREAS UTILIZADAS EN SISTEMAS AGROFORESTALES CON CAFÉ EN COMPARACIÓN CON EL QUERCUS COSTARICENSIS, COSTA RICA © 2023 by Nat-yel Yasir Sáenz Saborío is licensed under CC BY-NC-ND 4.0. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador integrado por Roger Moya Roque, Carolina Tenorio Monge y Mario Guevara Bonilla como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.



DEDICATORIA

*A mi persona, por luchar hasta
el final y no rendirme ante la
adversidad.*

AGRADECIMIENTOS

En mi primer lugar quiero agradecer a mi hermana, Paula Sáenz, ya que además de ser mi hermana ha sido una gran amiga que ha estado conmigo tanto en los buenos como en los malos momentos, y gracias a ella por aconsejarme y estar ahí cuando lo necesitaba para darme un empujón para seguir adelante con mi vida. Además de ayudarme en la redacción y en las prácticas de la defensa.

A mis gatos, Oreó y Midna, porque sus ronroneos y su presencia me hacían sentir mejor.

A mi papá, Alejandro Sáenz, por estar conmigo desde pequeña y luchar por mi bienestar y la de mis hermanos para que todos nosotros estudiemos al día de hoy.

Agradecer a Manfred Fallas Ureña y Michael Murillo Navarro ya que sin ustedes no hubiese empezado con mi TFG al igual que los encargados del laboratorio de Biomateriales de la Escuela de Ingeniería Forestal Robert Cubero Abarca, Carlos Olivares Gutiérrez, Didier Tencio Padilla, por guiarme en la recolección de datos en todo el proceso de TFG. Fue un gusto trabajar con ustedes.

También agradezco a mis profesores por enseñarme lo que sé ahora y espero usar esos conocimientos adelante, agradezco a Lupita Vargas, Mario Guevara, Carolina Tenorio, Dawa Méndez, Gustavo Torres y a Dorian Carvajal. Además, a mi tutor, Roger Moya, por guiarme en mi TFG y a Mario Guevara y Carolina Tenorio por dar lectura a mi trabajo.

A mi profesora, Monserrat Alfaro, por enseñarme japonés ya desde hace 3 años y por la comodidad de hablar con ella y por su confianza. Y también a mi compañera de japonés, Daiana.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	9
CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN	13
DEDICATORIA.....	14
AGRADECIMIENTOS	15
ÍNDICE DE CUADROS	19
ÍNDICE DE FIGURAS	19
1. INTRODUCCIÓN	20
2. MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.1 Especies y procedencia	23
2.2 Preparación del material	24
2.3 Caracterización de la materia prima.....	24
2.3.1 Contenido de humedad.....	24
2.3.2 Determinación de la densidad inicial.....	24
2.4 Proceso de carbonización.....	25
2.4.1 Reactor utilizado en la producción del carbón	25
2.4.2 Producción del carbón	25
2.4.3 Determinación del rendimiento del carbón.....	27
2.4.4 Determinación de los gases condensables y los no condensables	27
2.4.5 Determinación de los gases no condensables.....	27
2.5 Evaluación de las propiedades físicas del carbón.....	28
2.5.1 Determinación del contenido de humedad.....	28
2.5.2 Determinación de la densidad del carbón:	28

2.5.3	Determinación de la resistencia a la compresión	28
2.6	Evaluación de las propiedades calóricas del carbón vegetal.....	29
2.6.1	Cenizas	29
2.6.2	Volátiles	29
2.6.3	Determinación del poder calórico:.....	30
2.7	Evaluación de las propiedades térmicas del carbón vegetal.....	31
2.7.1	Espectroscopía FT-IR	31
2.8	Evaluación de las propiedades del biocarbón para enmiendas	31
2.8.1	Determinación de pH y la conductividad eléctrica.....	31
2.8.2	Determinación de la hidrofobicidad	32
5.5	Análisis estadísticos	32
3	Resultados	33
3.1	Evaluación del proceso de carbonización.....	34
3.1.1	Variación de la temperatura en función del tiempo	34
3.2	Evaluación del rendimiento del carbón, condensados y no condensables.	37
3.3	Evaluación de la propiedades físicas y mecánicas del carbón vegetal.	38
3.4	Evaluación de las propiedades calóricas del carbón vegetal.....	39
3.5	Espectroscopía FT-IR	41
3.6	Propiedades del carbón vegetal para enmiendas para el suelo	42
4	DISCUSIÓN	44
4.1	Evaluación del proceso de carbonización.....	44
4.2	Propiedades físicas, mecánicas y energéticas	45
4.3	Espectroscopía (FT-IR).....	48

4.4	Propiedades del carbón vegetal como enmiendas.....	49
5	CONCLUSIONES.....	53
6	RECOMENDACIONES.....	54
7.	REFERENCIAS.....	55

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Caracterización de la materia prima de la madera verde de las especies de Sistemas Agroforestales.	33
Cuadro 2. Rendimiento del carbón vegetal de las especies utilizadas en los sistemas agroforestales (SAF).	37
Cuadro 3. Propiedades calóricas del carbón de cinco especies arbóreas en comparación con el <i>Quercus costaricensis</i>	39
Cuadro 4. Propiedades de enmiendas para suelos de cinco especies arbóreas y tres especies de <i>Quercus</i>	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes del proceso de carbonización de la materia prima a carbón vegetal.	26
Figura 2. Variación de la temperatura de cinco especies arbóreas utilizadas en SAF, con respecto al tiempo en diferentes partes del reactor, (a) dentro del reactor, (b) salida de vapores y (c) antes de la condensación.	36
Figura 3. Propiedades físicas y mecánicas del carbón vegetal producido a 450° en comparación de <i>Quercus costaricensis</i>	38
Figura 4. Espectro del carbón vegetal de las especies de SAF y <i>Quercus</i>	41

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente los combustibles fósiles son la fuente de energía utilizada a nivel mundial para la generación de energía, sin embargo, el 80% de sus emisiones globales de dióxido de carbono son la principal causa del calentamiento global (Abid et al., 2023). En 2019, la distribución del consumo de energía a nivel mundial está dividido en petróleo 33%, carbón mineral 27%, gas natural con 24%, hidroelectricidad con 6%, renovables con 5% y nuclear con 4% (Mondragón, 2021). En la energía renovable tenemos a la energía hidráulica con un 60%, energía eólica con 21%, energía solar con 9% y la biomasa que aporta el 8% (Gutiérrez & García, 2021).

Dentro de la biomasa, se encuentran los materiales lignocelulósicos provenientes de la biomasa residual de la agricultura, silvicultura y vertederos (Adetona & Layzell, 2023). Los materiales lignocelulósicos pueden producir combustibles sólidos, líquidos y gaseosos para satisfacer la demanda de energía como calefacción, iluminación y transporte sin ningún tipo de carbono durante su funcionamiento (Adetona & Layzell, 2023).

En forma general se indica que la biomasa se deriva principalmente de residuos agroforestales, se producen alrededor de 1580 Mt de residuos agrícolas y 4,6 Gt de residuos forestales en todo el mundo (Sun et al., 2023). Las cuales se han considerado como materias primas atractivas para la producción de combustibles renovables de alta abundancia, bajo costo y versatilidad química. Además, que los biorresiduos agroforestales con baja densidad a granel pueden procesarse en gránulos de biomasa con alta estabilidad física y densidad, lo que podría reducir significativamente los costos de transporte, manipulación y almacenamiento de los biorresiduos agroforestales (Shen, 2021)

Dentro de los residuos lignocelulósicos, en la biomasa forestal se destacan las siguientes fuentes: residuos de las cosechas, madera no comerciable, madera eliminada durante el aclareo y otros materiales de residuos (Garvie et al., 2021). Estos residuos pueden ser provenientes de plantaciones forestales (Bose et al., 2023); bosques (Oberleitner, 2021). En los años pasados, la extracción de la biomasa de los

bosques naturales fue importante (Hyde et al., 2022), sin embargo, esto dio como resultado la deforestación de grandes áreas de bosques naturales en todo el mundo (Razzaghi et al., 2022). Como es el caso de Costa Rica con la especie *Quercus costaricensis* que ha sido deforestada la mayor parte de su área convirtiéndolo en terrenos agropecuarios (Deacon & Cavender-Bares, 2015; Marín Cabrera, 2022).

Por otra parte, en Costa Rica, el tipo de sistema agroforestales más utilizado es bajo la modalidad de sombra para café (Ovalle et al., 2020) por medio de conjunto de prácticas de manejo donde las especies arbóreas en asociación del café pueden garantizar la sostenibilidad y el fortalecimiento del desarrollo socioeconómico de las familias caficultoras (Cessa-Reyes, 2020).

Entre los beneficios destacan la mejora de la producción del sistema, aumentando la biodiversidad y evitando la erosión del suelo (Muthuri et al., 2023), enriqueciendo el suelo; mejora la calidad del agua y el aire; mejorando la resistencia a los cultivos de plagas y enfermedades (Pico-Mendoza et al., 2020).

No obstante, el uso de árboles, hasta el momento ha sido limitado, por lo que este material lignocelulósico, puede tener oportunidad para utilizar la biomasa en la producción el biocarbón, por medio de la pirólisis. La pirólisis es un proceso termoquímico en condiciones anaeróbicas (Li et al., 2020) a temperaturas entre 400°C y 800°C (Ercan et al., 2023) generando subproductos sólidos, líquidos y gaseosos (Guo et al., 2020). Sin embargo, estos subproductos van a depender del tamaño de partícula de biomasa, temperatura y el tiempo de la pirólisis (Qin et al., 2023).

En el caso específico del biocarbón tiene una estructura micro porosa y una gran superficie específica con una fuerte adsorción, aumentando la porosidad, contenido de materia orgánica, agua y nutrientes del suelo (Xiu et al., 2023), posee abundante oxígeno superficial que contiene grupos funcionales, un valor de pH típicamente alto, una capacidad de intercambio catiónico relativamente alta y abundantes materias primas (Yu Hu et al., 2022). además de ser utilizado como bioenergía (Qin et al., 2023).

Considerando lo anteriormente planteado, este trabajo tiene como objetivo evaluar la calidad considerando las características físicas, mecánicas, calóricas y térmicas, así como el carbón producido como enmienda del suelo de cinco especies arbóreas utilizadas como sombra de café entre ellas están *Erythina poeppigiana* (Poró gigante), *Eucalyptus deglupta* (Eucalipto), *Persea americana* (Aguacate), *Grevillea robusta* (Gravilia), e *Inga edulis* (Guaba chilillo), provenientes de varios sistemas agroforestales piralizada a temperatura de 450°C comparándolas con la especie de *Quercus costaricensis* que tradicionalmente eran usadas en Costa Rica para la producción de carbón.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Especies y procedencia

Para el presente fueron estudiado cinco especies arbóreas seleccionadas de sistemas agroforestales bajo la modalidad de café con sombra. Las especies fueron *Erythrina poeppogiana*, *Persea americana*, *Grevillea robusta*, *Eucalyptus deglupta* e *Inga edulis*. Luego los valores de propiedades físicas, mecánicas, calóricas, térmicos y fertilización de las especies fueron comparados con carbón de *Quercus costaricensis* a una temperatura de 450°C.

Fueron utilizadas las podas (ramas) con diámetros de 2-4 cm aproximadamente, como materia prima para la producción del carbón vegetal de las especies seleccionadas. Para la *Erythrina poeppogiana* (Poró gigante) y *Persea americana* (Aguacate), el material fue recogido en San Marcos de Tarrazú, (9°40'10,7" Norte y 83°59'42,0" Oeste); la *Grevillea robusta* (Gravilia) en Montes de Oro en San José (9°39'52,0" Norte y 84°02'53,1" Oeste); *Eucalyptus deglupta* (Eucalipto) en Naranjo, Juan Viñas de Turrialba (9°53'43.8" Norte y 83°45'56.8" Oeste); e *Inga edulis* (Guaba chilillo) en una de las fincas del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) (9°52'44.9" Norte 83°39'28.4" Oeste).

2.2 Preparación del material

Las ramas o el material recolectado se aserraron por medio de una sierra cinta en dimensiones de 12 x 4 x 2 cm (largo, ancho y espesor). Luego las muestras fueron secadas al aire a temperatura y condiciones del ambiente por un periodo que varió de 3 a 4 semanas.

2.3 Caracterización de la materia prima

La caracterización de la materia prima se realizó para las siguientes variables: contenido de humedad y densidad de la materia prima, antes de someterla al proceso de carbonización.

2.3.1 Contenido de humedad

Para la determinación del contenido de humedad se cortaron 10 muestras de diferentes secciones de las podas de las 5 especies seleccionadas, en donde se pesaron el peso verde y después se llevaron al horno a 103° durante 24 horas y se sacaron para volverlas a pesar y así tener el peso seco. El contenido de humedad se calculó por medio de la ecuación 1.

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \frac{\text{Peso verde} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100 \quad (1)$$

2.3.2 Determinación de la densidad inicial

Para la determinación de la densidad de la materia prima, se pesó y se midió las dimensiones de largo, ancho y espesor. Para su cálculo se utilizó la ecuación 2.

$$\text{Densidad inicial} = \frac{\text{Peso inicial (g)}}{\text{Volumen inicial (cm}^3\text{)}} \times 100 \quad (2)$$

2.4 Proceso de carbonización

2.4.1 Reactor utilizado en la producción del carbón

En la figura 1, se muestra los componentes del ensayo del proceso de carbonización, de los cuales se constituyen en: (1) un reactor de forma cilíndrica de 12 cm de diámetro y una longitud de 30 cm, con 3 litros de capacidad. El Reactor está provisto de una doble pared y en el interior hay una resistencia de 2000 watts (Balaguer, 2019). (2) La Llave de entrada de nitrógeno al interior del reactor; (3) el Manómetro para la medición de la presión dentro del reactor la cual debe de alcanzar como mínimo 120 PSI o 8,5 kg/cm²; (4) la Llave de salida de los gases es aquella que se cierra antes de la introducción de nitrógeno para evitar fugas de gas y una vez introducido el nitrógeno esta llave se abre lentamente para liberar el producto gaseoso del reactor y lo dirige a los condensadores. (5) Los Condensadores son los encargados de transformar los gases producidos en la pirólisis a líquido. (6) Además, estos condensadores son acompañados de un tanque para almacenar agua con refrigerante y la bomba para hacer circular ésta. Finalmente, los condensables se depositan dentro del balón (7).

2.4.2 Producción del carbón

Dos corridas para cada especie fueron llevadas a cabo, por lo que 26 piezas en cada especie fueron pirolizadas, es decir, se utilizaron 260 piezas en total. Las muestras se introdujeron en el reactor y se cerró, luego se inyectó nitrógeno a una presión de 2 MPa, para expulsar el oxígeno dentro del reactor, y luego se cerraron las válvulas de entrada y salida. Se encendió la resistencia y se calentó a una velocidad de 25 °C/min. Cuando se alcanzó la temperatura de aproximadamente de 275 °C, la válvula se abrió para que los gases de la pirólisis salieran (Balaguer, 2019).

Después de cerrado el reactor, se cerró la llave de salida de los gases para evitar una fuga, seguidamente se abrió la llave de entrada de nitrógeno y se abrió lentamente la llave de la salida de los gases. Los gases pasaban por los refrigerantes o condensadores y así, se condensaron los gases, y se depositaron en el balón.

Lo condensados depositados en el balón se dejaron enfriar en unos frascos con sus respectivas especies y corridas. El contenido de cada frasco fue depositado en un embudo separador de laboratorio, donde por medio de la decantación, se dejó reposar hasta que el alquitrán se sedimentara y siendo posible su extracción por gravedad, y así colocar el bioaceite y el alquitrán en frascos separados.

En el proceso de pirolización se utilizó un registrador de datos o Testo modelo 176/T4 para evaluar la variación de la temperatura con respecto al tiempo y se registró en tres sitios diferentes: la sonda 1 dentro del reactor, la sonda 2 de los gases al salir por la válvula y la sonda 3 para los gases antes de la condensación. En la figura 1 se observa los componentes que se utilizaron para dicho propósito y los sitios donde se registraron las temperaturas.

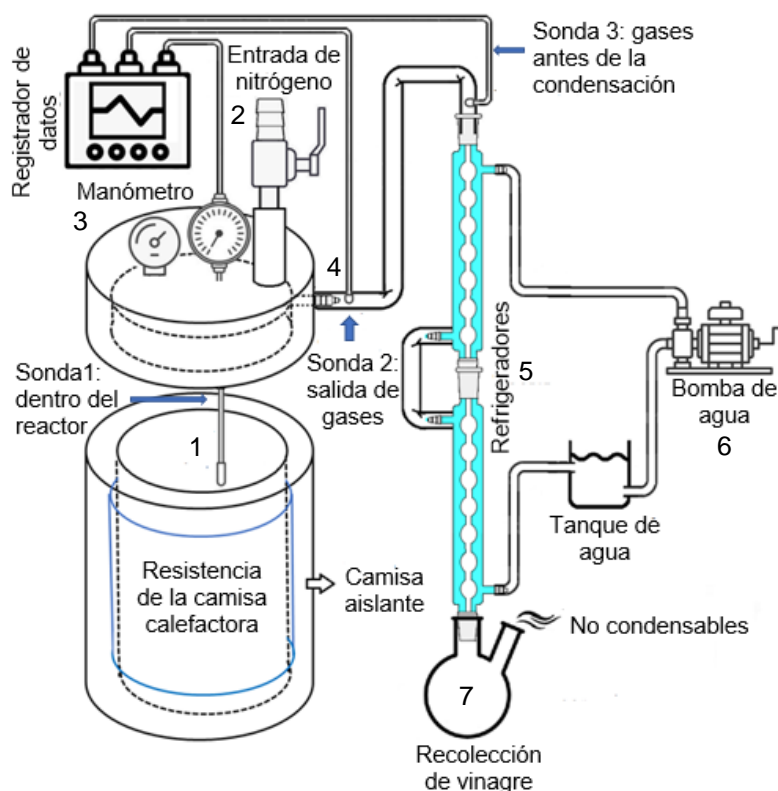


Figura 1. Componentes del proceso de carbonización de la materia prima a carbón vegetal.

Nota: Elaborado por Moya, 2023.

2.4.3 Determinación del rendimiento del carbón

El rendimiento del carbón vegetal fue determinado de la siguiente forma: la madera inicial se pesó en una balanza (muestra verde de las piezas aserradas antes de introducirlas al reactor) y el peso del carbón es la materia prima carbonizada después del proceso de la pirólisis. Seguidamente el rendimiento se calculó por la ecuación 3.

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{\text{Peso del carbón (g)}}{\text{Peso muestra verde (g)}} \times 100 \quad (3)$$

2.4.4 Determinación de los gases condensables y los no condensables

Para determinar el rendimiento de los gases condensables, se utilizó los líquidos colectados en el sistema de recolección y enfriamiento del reactor (Figura 1). Los líquidos condensados fueron pesados y se evaluó por la relación entre la masa de los condensados y el peso inicial de la madera de cada corrida en las diferentes temperaturas con la ecuación 4 (Ecuación 4).

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

El porcentaje de los condensados fueron calculados tres diferentes tipos: (a) totales, que es la mezcla total del proceso de carbonización, (b) solución acuosa y (c) el bioaceite, estos son los resultados provenientes de la separación de los condensados totales mediante decantación.

2.4.5 Determinación de los gases no condensables

Se realizó la ecuación 5 para conocer los valores de los pesos de los productos condensados y del rendimiento del carbón.

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

2.5 Evaluación de las propiedades físicas del carbón

Para las pruebas físicas, se cortaron las piezas en dimensiones de 2 x 2 x 2 cm (largo, ancho y espesor) para el contenido de humedad y la densidad de carbón, mientras que para la prueba de resistencia a la compresión fueron extraídas las muestras de 2 x 2 x 5 cm.

2.5.1 Determinación del contenido de humedad

Para la determinación del contenido de humedad del carbón, se utilizaron 15 muestras por especies, es decir, se utilizaron 75 muestras en total. Las muestras se pesaron en una balanza analítica para conocer el peso inicial después del proceso de pirólisis, seguidamente se secaron en el horno con una temperatura de 103 °C durante 24 horas para obtener el peso seco o final del carbón. Se calculó el contenido de humedad mediante la ecuación 6.

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \left[\frac{(\text{Peso inicial} - \text{Peso final})}{\text{Peso inicial}} \right] \times 100 \quad (6)$$

2.5.2 Determinación de la densidad del carbón:

Para la determinación de la densidad del carbón, se utilizaron 15 muestras por especies, es decir, 75 muestras en total. Se utilizó la balanza analítica para pesar las muestras y el vernier para medir las dimensiones de largo, ancho y espesor. Para el cálculo de la densidad se utilizó la ecuación 7.

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

2.5.3 Determinación de la resistencia a la compresión

Para la determinación a la resistencia a la compresión se utilizaron 12 muestras por especies, en total fueron 60 muestras. En ellas se aplicaron ensayos de compresión paralela a la fibra con una velocidad de carga de 0,3 mm/min, del cual se utilizó la máquina universal de ensayos Tinius Olsen, de 1000 kg de capacidad, obteniendo como resultado la resistencia a la compresión.

2.6 Evaluación de las propiedades calóricas del carbón vegetal

2.6.1 Cenizas

Se determinó el contenido de cenizas de las muestras según la norma ASTM D1762-84. Para ello, se molió y se tamizó el carbón a un tamaño de partícula entre 40 – 60 mesh (250-420 μm) para después ser llevados al horno a una temperatura de 103 °C por 24 horas para eliminar la humedad, después de ese tiempo se colocó dentro de un desecador para que se estabilizara las muestras. Por otra parte, se llevaron 30 crisoles a 800 °C en el horno de la mufla durante 1 hora para así eliminar, por medio de la incineración, cualquier tipo de residuos que hubiese quedado en los crisoles.

En cada uno de los crisoles fueron colocados 1 gramo de la muestra de carbón y fue llevado a una mufla a 800 °C durante 2 horas aproximadamente (en algunas especies varió el tiempo de incineración), después de ese tiempo, los crisoles fueron colocados en un desecador para que se estabilizaran las muestras y se pesaron en una balanza analítica. Para el cálculo del porcentaje de cenizas se utilizó la ecuación 8.

$$\text{Cenizas (\%)} = \frac{P3 - P1}{P2 - P1} \times 100 \quad (8)$$

Donde:

P1 = Peso de crisol vacío (g)

P2 = Peso del crisol con 1 gramo muestra antes de incinerarse (g)

P3 = Peso del crisol y de las cenizas después de la incineración (g)

2.6.2 Volátiles

Se determinó el contenido de volátiles de las muestras según la norma ASTM D1762-84. Para ello, se molió y se tamizó el carbón a un tamaño de partícula entre 40 – 60 mesh (250-420 μm) para después ser llevados al horno a una temperatura de 103 °C por 24 horas para eliminar la humedad, Para la determinación del porcentaje de volátiles se calentó la mufla a 900 °C, y se colocaron los crisoles con las tapas y con 1 gramo contenido en estas (como en la prueba anterior, los crisoles fueron calcinados

y las muestras fueron secadas en el horno). La duración de la prueba fue de 11 minutos, donde, durante 2 minutos se colocó el soporte con los dos crisoles encima de la puerta del horno de la mufla, a los 3 minutos se colocó en la entrada del horno de la mufla y con la puerta abierta y finalmente, se colocó al final del horno de la mufla y con la puerta cerrada durante 6 minutos. Se colocaron en un desecador para evitar la ganancia de humedad, y una vez enfriadas se prosiguió a pesarlas. Para el cálculo del porcentaje de volátiles se utilizó la ecuación 9.

$$\text{Volátiles (\%)} = 100 - \frac{P3 - P1}{P2 - P1} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

P1 = Peso de crisol vacío (g)

P2 = Peso del crisol con 1 gramo muestra antes de incinerarse (g)

P3 = Peso del crisol y de las cenizas después de la incineración (g)

2.6.3 Determinación del poder calórico:

Fue seguido el estándar ASTM D5865-13 (2013) para determinar el poder calórico de las muestras del carbón, del cual se utilizó un calorímetro Semimicro marca Parr modelo 6725. Se utilizaron cinco muestras por especie

En primer lugar, se colocó una pastilla entre 0,8 a 1,2 g de ácido benzoico, para igualar las condiciones de operación y determinar el poder calórico de la muestra desconocida (Gallo et al, 2018). Se utilizaron cinco muestras por especie a un contenido de humedad al 0%, con un peso similar a la pastilla del ácido benzoico, en donde cada una de estas se pesó en una balanza analítica con una precisión de 0,0001 g.

Después se colocó 450 ml de agua en la bomba calorimétrica, se conectó un fusible medido y se montó la bomba. Se añadió el oxígeno a la bomba con una presión constante de 3 MPa o 30 atmósferas. La corriente administrada por los electrodos generó el calor requerido para iniciar la combustión y el valor calorífico de la muestra de análisis se calcula multiplicando el aumento de la temperatura corregido.

2.7 Evaluación de las propiedades térmicas del carbón vegetal

2.7.1 Espectroscopía FT-IR

La Espectroscopía Infrarroja transformada por Fourier (FTIR) es una técnica usada para identificar grupos funcionales o sustancias químicas en una muestra sólida (carbón vegetal), permite transformar la energía radiante que pasa por el sólido en energía medible. El método se basa en la absorción de la radiación infrarroja por medio de las moléculas del carbón vegetal por vibración, en un rango aproximado de 800cm^{-1} – 1400cm^{-1} (Guangsig, 2022).

El análisis de espectroscopía infrarroja transformada por Fournier (FTIR) se llevó a cabo en una muestra de carbón vegetal de cada especie. Las muestras tenían un tamaño de $420\ \mu\text{m}$ y $250\ \mu\text{m}$, con tamices de 40 y 60 mesh, respectivamente. Estas muestras se secaron en un horno a $105\ ^\circ\text{C}$ y posteriormente, se realizó el escaneo FTIR utilizando espectrómetro Nicolet 380 FTIR.

2.8 Evaluación de las propiedades del biocarbón para enmiendas

Se analizó el carbón vegetal considerando tres parámetros evaluados para las propiedades del biocarbón según Masís-Meléndez et al. (2020): conductividad, pH e hidrofobicidad.

2.8.1 Determinación de pH y la conductividad eléctrica

Se molió carbón vegetal con un tamaño de $420\ \mu\text{m}$ y $250\ \mu\text{m}$, malla 40 y 60, respectivamente y se tomaron 5 muestras de 2 g. La muestra se ubicó en un matraz de plástico de 50 mL con 30 ml de agua desionizada, y la mezcla se agitó en un agitador orbital Hotech Instruments Corp. 702R, TPE, Taiwán, durante 1 h a 30 ± 1 rpm y $25 \pm 0,25\ ^\circ\text{C}$. Posteriormente, la muestra se filtró utilizando el papel Sartorius Stedim número 393. En primer lugar, se midió el pH de la solución filtrada utilizando un medidor de sobremesa (Oakton, ION 700, IL EE. UU.). Después, la conductividad de estas soluciones se midió con un medidor de conductividad del agua Hanna Instruments HI98312, R.I, EE. UU.

2.8.2 Determinación de la hidrofobicidad

Las partículas de biocarbón se extendieron sobre una cinta adhesiva de doble cara fijada al extremo esmerilado de un portaobjetos de vidrio de microscopio (24,4 mm × 76,2 mm); Se utilizó un peso de 100 g para presionar las partículas de biocarbón sobre la cinta durante 5 s, después de lo cual se eliminó el exceso aplicando una ligera vibración. Luego se midió una pequeña gota (2 µL) sobre una superficie cubierta con polvo de biocarbón (fracción de tamaño de partícula <63 µm) a 20 °C según el método de Bachmann et al. (2000). La repelencia al agua del material se midió colocando una pequeña gota de agua en la superficie y registrando el ángulo de contacto cada 10 s durante 1500 s (25 min) utilizando un goniómetro automatizado ramé-hart Modelo 590, ramé-hart instruments co, NJ, USA, con el software DROPimage 2.5.02 de Finn Knut Hansen, OS, Noruega, 2006. Se midieron dos ángulos de contacto, es decir, el ángulo de contacto inicial (θ_{inicial}) y el ángulo de contacto a los 25 min (θ_{25}). Posteriormente, se calculó la tasa de humectación como la variación del ángulo de contacto

5.5 Análisis estadísticos

Primeramente, se realizó la prueba de normalidad para cada variable y la homogeneidad de varianzas para ver si se cumplía con los supuestos de normalidad, seguidamente se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar si había diferencias significativas entre las características de las especies evaluadas, al igual que la *Persea americana*, *Eucalyptus deglupta*, *Inga edulis*, *Erythrina poeppigiana*, *Grevillea robusta* y el *Quercus costaricensis*. Para la diferencia de medias se determinó mediante la prueba Tukey ($p < 0,05$). Los análisis estadísticos fueron analizados mediante el programa R y RStudio.

3 Resultados

3.1 Caracterización de la materia prima

Cuadro 1. Caracterización de la materia prima de la madera verde de las especies de Sistemas Agroforestales.

Especie	Contenido de humedad (%)	Densidad (g/cm ³)
<i>Persea americana</i>	12,24 (0,32)	0,58 (5,82)
<i>Eucalyptus deglupta</i>	12,80 (2,38)	0,75 (6,83)
<i>Grevillea robusta</i>	16,81 (23,77)	0,60 (8,42)
<i>Inga edulis</i>	15,79 (32,80)	0,54 (12,22)
<i>Erythrina poeppigiana</i>	17,18 (3,82)	0,45 (16,29)

Nota: Los números entre paréntesis corresponde al coeficiente de variación.

Según la información proporcionada en el cuadro anterior, se puede apreciar que las especies de SAF obtuvieron niveles de contenido de humedad con variaciones desde el 12% y el 17%. Destacando que la *Erythrina poeppigiana* fue el que obtuvo el mayor valor, mientras la *Persea americana* y el *Eucalyptus deglupta* mostraron los valores más bajos en este aspecto.

En cuanto a la densidad, se observa como el *Eucalyptus deglupta* presentó la mayor densidad con 0,75 g/cm³, mientras que la *Erythrina poeppigiana* reportó el valor más bajo, con 0,45 g/cm³.

3.2 Evaluación del proceso de carbonización

3.2.1 Variación de la temperatura en función del tiempo

En la evaluación del proceso de carbonización, el factor de la variación de la temperatura en función del tiempo de las diferentes partes del reactor, de cada una de las especies estudiadas se puede observar en la figura 2.

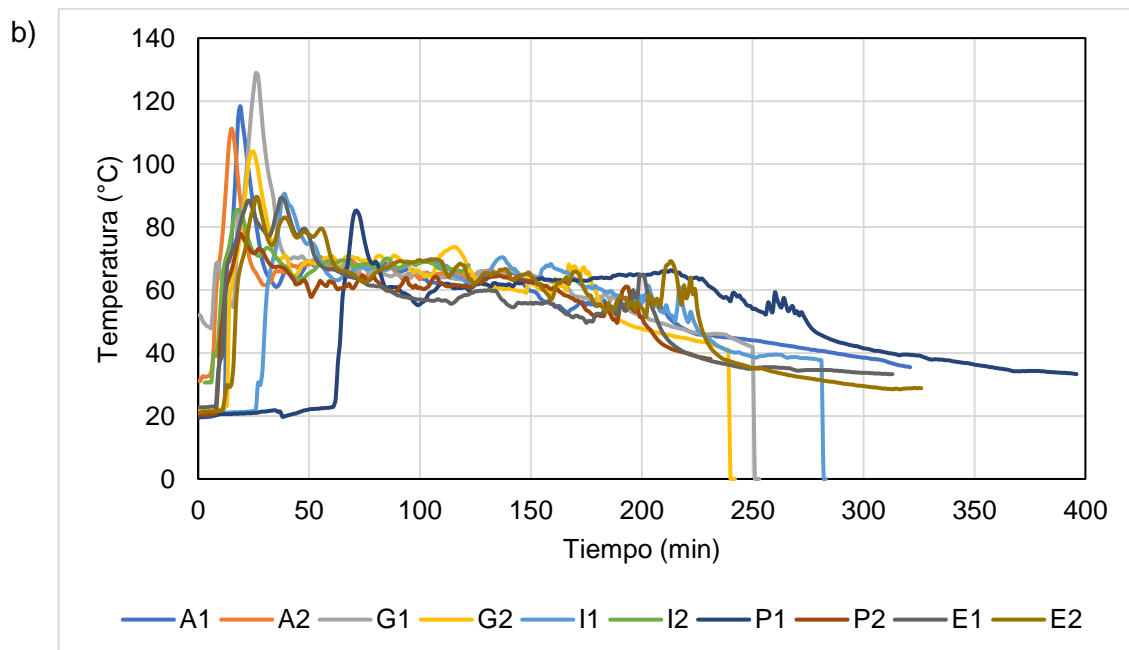
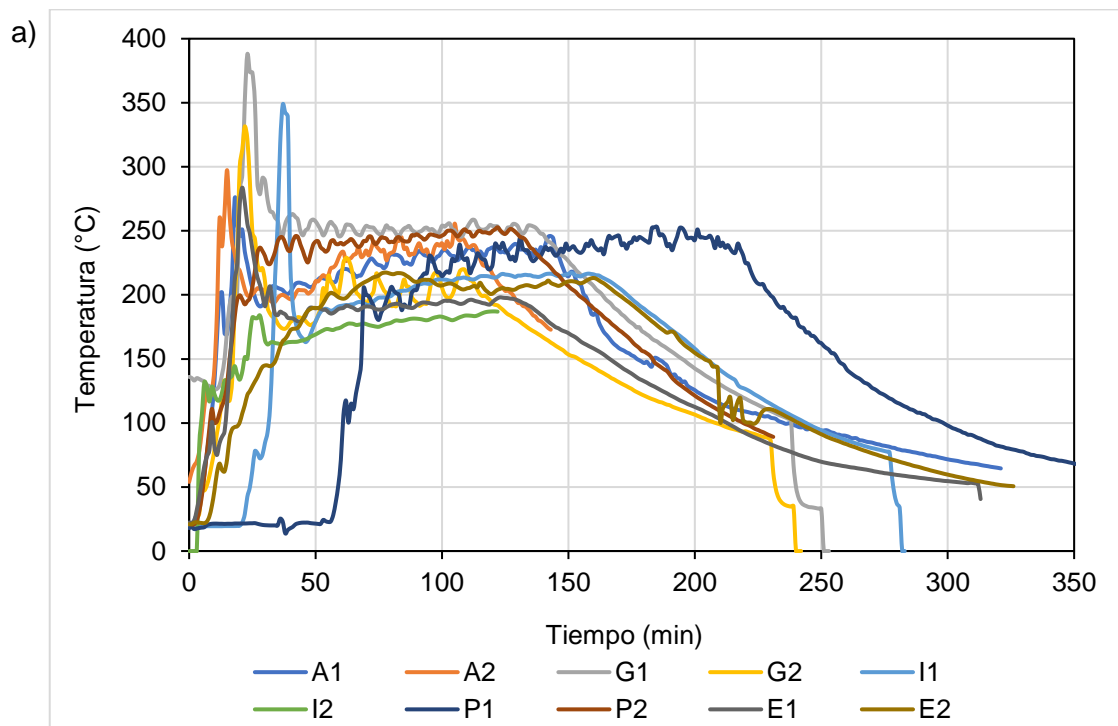
El proceso de carbonización de las especies arbóreas se extendió durante 2 horas, concluyendo con la salida de los gases en la cámara donde estaba ubicado el reactor. Por otro lado, el tiempo total del ensayo fue desde que comenzó el proceso de carbonización hasta que la temperatura del reactor descendió hasta los 180 °C, permitiendo de este modo abrir el reactor, obteniendo un tiempo aproximado entre 4 y 5 horas.

En la figura 2a, el tiempo promedio de los picos de temperatura varió en cada especie, siendo el Aguacate con 16,5 minutos; Gravilia con 22,5 minutos; Eucalipto con 49,5 minutos; Inga con 79 minutos y por último el Poró con 153,5 minutos en la primera sonda dentro del reactor. Por otro lado, la mayor temperatura de las especies fueron las siguientes: Gravilia-1 con 387,7 °C; Inga-1 con 348,4 °C y finalmente Gravilia-2 con 331,5 °C; en estas especies la duración del ensayo fue menor a una hora del inicio.

En la figura 2b, para la segunda sonda de la salida de los gases el tiempo promedio con las mayores temperaturas fueron las siguientes: Aguacate con 17 minutos; Gravilia con 25,5 minutos; Inga con 28,5 minutos; Eucalipto con 32 minutos y finalmente el Poró con 45 minutos. La variable salida de vapores 2 [°C] muestra la temperatura donde la Gravilia-1, también obtuvo la mayor temperatura con 128,9 °C, mientras que esta vez, las dos corridas de aguacate le sucedieron, Aguacate-1 con 118,4 °C; y Aguacate-2 con 111,3 °C.

En la figura 2c se muestra el tiempo donde se obtuvo la mayor temperatura antes de la condensación de los gases, donde el mayor tiempo fue la especie de Aguacate con 16 minutos; Eucalipto con 19,5 minutos; Gravilia con 24,5 minutos; Inga con 27,5 minutos; y Poró con 45,5 minutos. Por último, las temperaturas antes de la

condensación fueron, Gravía-1 de 97,1 °C; Aguacate-1 de 96,8 °C; y Aguacate-2 con 83,3 °C en donde ocurrió menos de los 30 minutos.



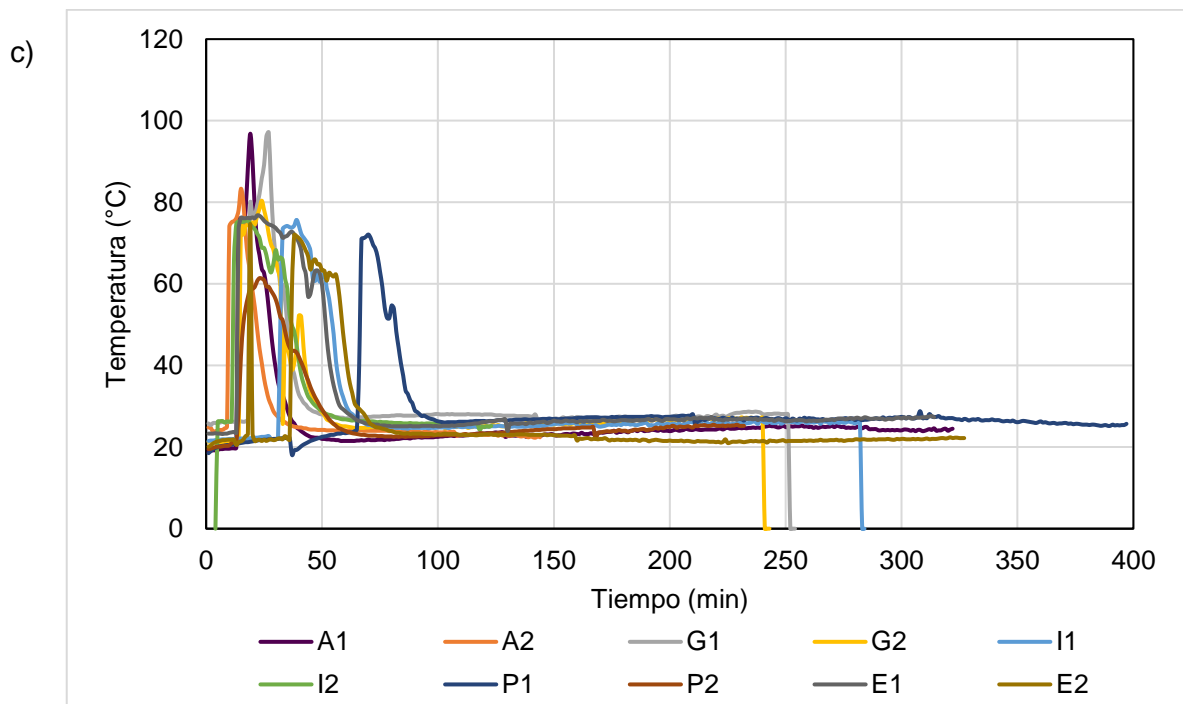


Figura 2. Variación de la temperatura de cinco especies arbóreas utilizadas en SAF, con respecto al tiempo en diferentes partes del reactor, (a) dentro del reactor, (b) salida de vapores y (c) antes de la condensación.

Nota: Los símbolos corresponden a A1 Aguacate corrida 1, A2 Aguacate corrida 2, G1 Gravilia corrida 1, G2 Gravilia corrida 2, I1 Inga corrida 1, I2 Inga corrida 2, P1 Poró corrida 1, P2 Poró corrida 2, E1 Eucalipto corrida 1 y E2 Eucalipto corrida 2.

3.3 Evaluación del rendimiento del carbón, condensados y no condensables.

Cuadro 2. Rendimiento del carbón vegetal de las especies utilizadas en los sistemas agroforestales (SAF).

Especie	Carbón (%)	Condensados (%)	No condensados (%)
<i>Eucalyptus deglupta</i>	30,85	37,14	32,01
<i>Inga edulis</i>	35,27	32,73	32,01
<i>Grevillea robusta</i>	29,33	32,37	38,30
<i>Erythrina poeppigiana</i>	39,39	32,33	28,28
<i>Persea americana</i>	22,33	29,15	48,53

De acuerdo con el cuadro anterior, se puede apreciar el rendimiento de los productos generados del proceso de la pirólisis, como el carbón, los condensables totales (mezcla de los alquitranes y el bioaceite) y los no condensables.

Dicho esto, la *Erythrina poeppigiana* se destacó al lograr el rendimiento más alto en el carbón, alcanzando un 39,4%, siendo también la especie con el menor rendimiento en no condensados, registrando un 28,3%. En contraste, la *Persea americana* mostró un desempeño inverso, obteniendo el mayor rendimiento en productos no condensables con un 49,5%, mientras que su rendimiento en carbón fue el más bajo, con un 22,3%. En cuanto a la *Inga edulis*, se posicionó como la segunda especie con mayor rendimiento en carbón, registrando un 35,3%, con proporciones similares en los productos condensables y no condensables, con un 32,7% y 32,0%, respectivamente. Por último, el *Eucalyptus deglupta* lideró en el rendimiento de condensables, alcanzando un 37,1%, manteniendo proporciones similares entre los productos de carbón y no condensables, 30,85% y 32,01%.

3.4 Evaluación de la propiedades físicas y mecánicas del carbón vegetal.

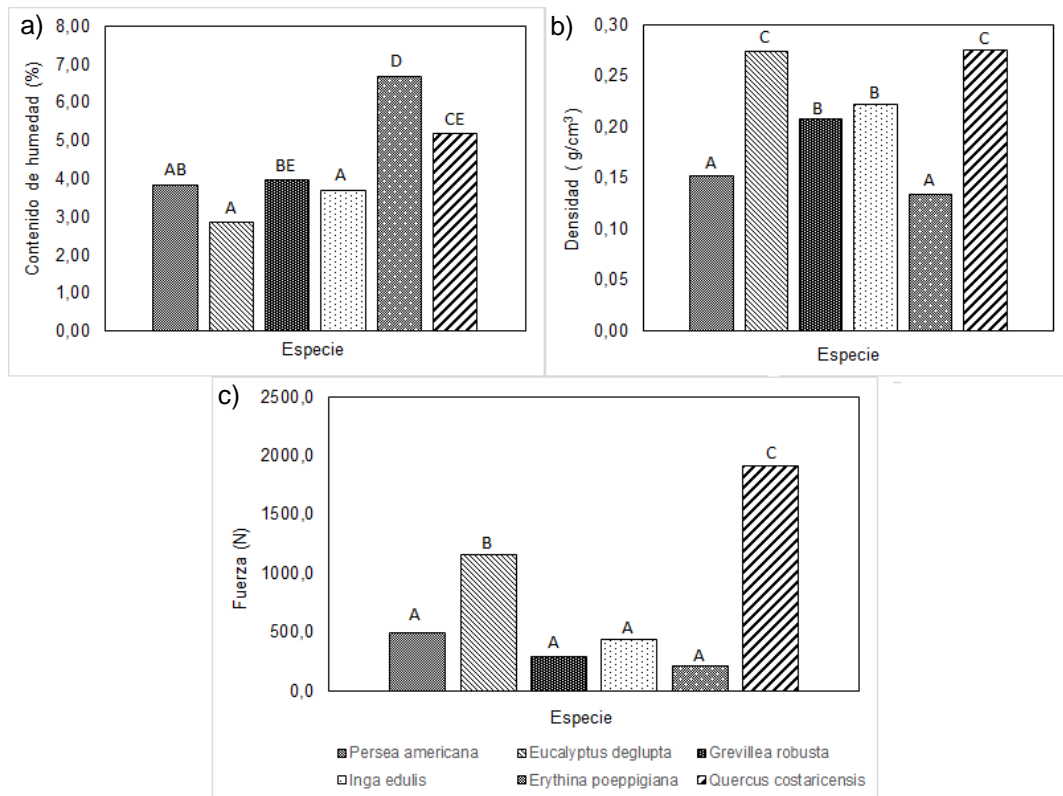


Figura 3. Propiedades físicas y mecánicas del carbón vegetal producido a 450° en comparación de *Quercus costaricensis*.

Nota: Las letras ubicadas en el área del gráfico indican los resultados del análisis estadístico. Los datos de las variables con la misma letra no presentan diferencias significativas entre sí.

Según la figura 3a, el contenido de humedad de las especies de SAF en comparación con el *Quercus* presentaron diferencias significativas, a excepción de *Gravilia* que no presentó diferencias significativas con el *Quercus*. Según el gráfico, el *Poró* presentó mayor contenido de humedad con 6,67%; seguido de *Gravilia-Quercus* (4,40%), *Aguacate* (3,83%); *Inga* (3,71%) y *Eucalipto* (2,88%). Entre las especies de SAF no se presentaron diferencias significativas.

En la figura 3b, la densidad de las especies de SAF en comparación con el *Quercus* presentaron diferencias significativas, a excepción de *Eucalipto* que no presentó diferencias significativas con el *Quercus*. La mayor densidad se presentó en el

Quercus y el Eucalipto (Q-E) con un promedio de 0,27 g/cm³, seguido de Gravilia e Inga (G-I) que no presentaron diferencias significativas. Por último, entre el Aguacate y el Poró (A-E) tampoco hubo diferencias significativas.

En la figura 3c, la fuerza de compresión aplicada al carbón de las diferentes especies de SAF en comparación con el Quercus, presentaron diferencias significativas entre ellas. La mayor fuerza aplicada fue el Quercus con 1908 N, seguido de Eucalipto con 1155 N y, por último; el Aguacate, Gravilia, Inga y Poró (A-G-I-P) en el cual no presentaron diferencias significativas entre éstas.

3.5 Evaluación de las propiedades calóricas del carbón vegetal

Cuadro 3. Propiedades calóricas del carbón de cinco especies arbóreas en comparación con el *Quercus costaricensis*.

Especie	Poder calórico (kJ/kg)	Volátiles (%)	Cenizas (%)
<i>Persea americana</i>	30939,153 ^A (9,754)	18,628 ^A (7,344)	5,050 ^B (9,858)
<i>Eucalyptus deglupta</i>	32958,609 ^A (11,051)	19,812 ^A (2,983)	3,282 ^A (3,880)
<i>Grevillea robusta</i>	30189,874 ^A (12,236)	17,288 ^{AB} (9,782)	4,097 ^A (7,760)
<i>Inga edulis</i>	29011,382 ^A (6,719)	18,266 ^A (6,406)	5,923 ^C (6,759)
<i>Erythrina poeppigiana</i>	29580,588 ^A (15,641)	15,954 ^B (7,383)	9,87 ^D (8,353)
<i>Quercus costaricensis</i>	28362,842 ^A (2,679)	32,21 ^C (0,586)	0,887 ^E (9,155)

Nota: Los números entre paréntesis corresponde al coeficiente de variación. Las letras del superíndice indican los resultados del análisis estadístico. Los datos con las mismas letras no presentan diferencias significativas entre sí.

En el cuadro 2 muestra los valores del poder calórico de las especies de SAF en comparación con el Quercus, de las cuales no presentaron diferencias significativas entre ellas.

Con respecto a los volátiles, el Quercus presentó diferencias significativas con las especies de SAF. El Quercus fue la especie que obtuvo el mayor porcentaje de volátiles, con 32,2%; seguido del Aguacate, Eucalipto, Gravia e Inga (A-E-G-I) que no presentaron diferencias significativas entre sí y que obtuvieron un promedio de 18,5%. Por último, las especies de Poró y Gravia (P-G) no presentaron diferencias significativas, obteniendo un promedio de 16,6%.

En el porcentaje de cenizas, el Quercus presentó diferencias significativas a las especies de SAF, así que la mayor cantidad de cenizas obtenido fue del Poró con 9,9%; Inga con 5,3%; Aguacate con 5,0%; Gravia con 4,1%; Eucalipto y Gravia no presentaron diferencias significativas entre ellas, obteniendo como promedio 3,7% y, por último, el Quercus con 0,9%.

3.6 Espectroscopía FT-IR

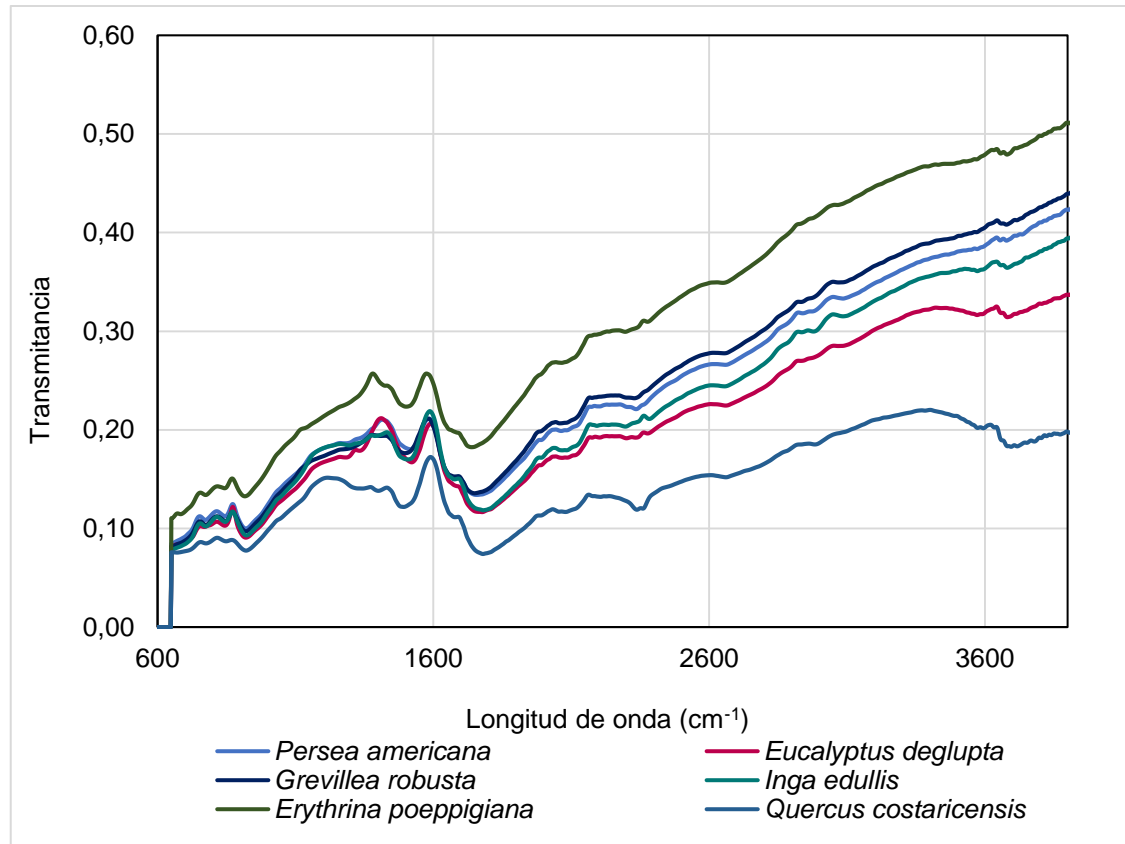


Figura 4. Espectro del carbón vegetal de las especies de SAF y Quercus.

Según la figura anterior; se muestra la transmitancia con respecto a la longitud de onda de las muestras de carbón vegetal. En donde las vibraciones principales se dieron en las longitudes de onda determinadas entre los 600 y 3800 cm^{-1} .

La especie de *Erythrina poeppigiana* presentó una mayor transmitancia que las demás especies. Mientras que la *Persea americana*, *Grevillea robusta*, *Eucalyptus deglupta* e *Inga edulis* presentaron una transmitancia similar. Caso contrario al *Quercus costaricensis* que es más baja que las demás especies.

3.7 Propiedades del carbón vegetal para enmiendas para el suelo

Cuadro 4. Propiedades de enmiendas para suelos de cinco especies arbóreas y tres especies de *Quercus*.

Especie	pH	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Ángulo inicial ($^{\circ}$)	Ángulo final ($^{\circ}$)	Rango ($^{\circ}/\text{min}$)
<i>Persea americana</i>	8,620 ^A (3,877)	155,250 ^A (43,786)	119,600 ^A (2,804)	103,325 ^A (3,260)	0,814 ^A (11,177)
<i>Eucalyptus deglupta</i>	8,703 ^A (0,413)	156,000 ^A (14,005)	100,000 ^{BE} (3,611)	65,600 ^{AB} (24,217)	1,720 ^{AB} (39,080)
<i>Grevillea robusta</i>	9,130 ^B (0,759)	667,50 ^B (9,436)	86,550 ^{CB} (7,376)	32,125 ^{BCD} (56,380)	2,721 ^B (27,962)
<i>Inga edulis</i>	9,125 ^B (1,482)	206,000 ^A (17,126)	110,700 ^{AE} (4,410)	77,000 ^A (17,473)	1,685 ^{AB} (25,495)
<i>Erythrina poeppigiana</i>	10,108 ^C (1,687)	3385,250 ^C (13,440)	65,075 ^D (6,498)	26,425 ^C (51,764)	1,933 ^{AB} (27,542)
<i>Quercus costaricensis</i>	4,475 ^D (1,738)	12,500 ^A (16,971)	101,050 ^{AB} (7,347)	78,400 ^{AD} (21,105)	1,133 ^{AB} (40,272)

Nota: Los números entre paréntesis corresponde al coeficiente de variación. Las letras del superíndice indican los resultados del análisis estadístico. Los datos con las mismas letras no presentan diferencias significativas entre sí.

En el cuadro anterior, el pH de las especies de SAF presentaron diferencias significativas con el *Quercus*, destacando que las especies de SAF presentaron un pH básico, como el Poró que obtuvo un resultado de 10,1; *Gravilia* e *Inga* (G-I) no presentaron diferencias significativas, obtuvo un promedio de 9,1; y finalmente el Aguacate y el Eucalipto (A-E) tampoco presentaron diferencias significativas, con un promedio de 8,7. En contraste con el *Quercus* que obtuvo un resultado de 4,5; siendo este un pH ácido.

En el caso de la conductividad eléctrica, el *Quercus* solo presentó diferencias significativas con la *Gravilia* y el Poró. Por lo que el Aguacate, Eucalipto, *Inga* y *Quercus* no presentaron diferencias significativas, donde se obtuvo un promedio de 132,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$; la *Gravilia* con 667,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y finalmente el Poró con 3385,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

el Quercus no presentó diferencias significativas al igual es el caso entre las especies de SAF con Inga, Eucalipto y Aguacate. Siendo el Poró (3385 $\mu\text{S/cm}$) y Gravilia (667 $\mu\text{S/cm}$) los que presentaron diferencias entre las demás especies.

Continuando con el cuadro 3 y la figura 5, el ángulo inicial del Quercus (101°) presentó solo diferencias significativas con el Poró ($65,1^\circ$). Mientras que entre las especies de SAF, la Gravilia ($86,5^\circ$) presentó diferencias significativas con el Aguacate ($119,6^\circ$), con la Inga ($110,7^\circ$) y con el Poró ($65,1^\circ$). En el caso del ángulo final, el Quercus ($78,4^\circ$) también presentó diferencias significativas con el Poró ($26,4^\circ$). Entre las especies de SAF, los que no presentaron diferencias significativas fueron el Aguacate, Eucalipto e Inga(A-E-I); Eucalipto y Gravilia (E-G); y la Gravilia y el Poró (G-P). Por último, el rango de humectabilidad, el Quercus no presentó diferencias significativas entre las especies de SAF, solo el Aguacate ($0,814^\circ/\text{min}$) y la Gravilia ($2,721^\circ/\text{min}$) presentaron diferencias significativas entre ellas.

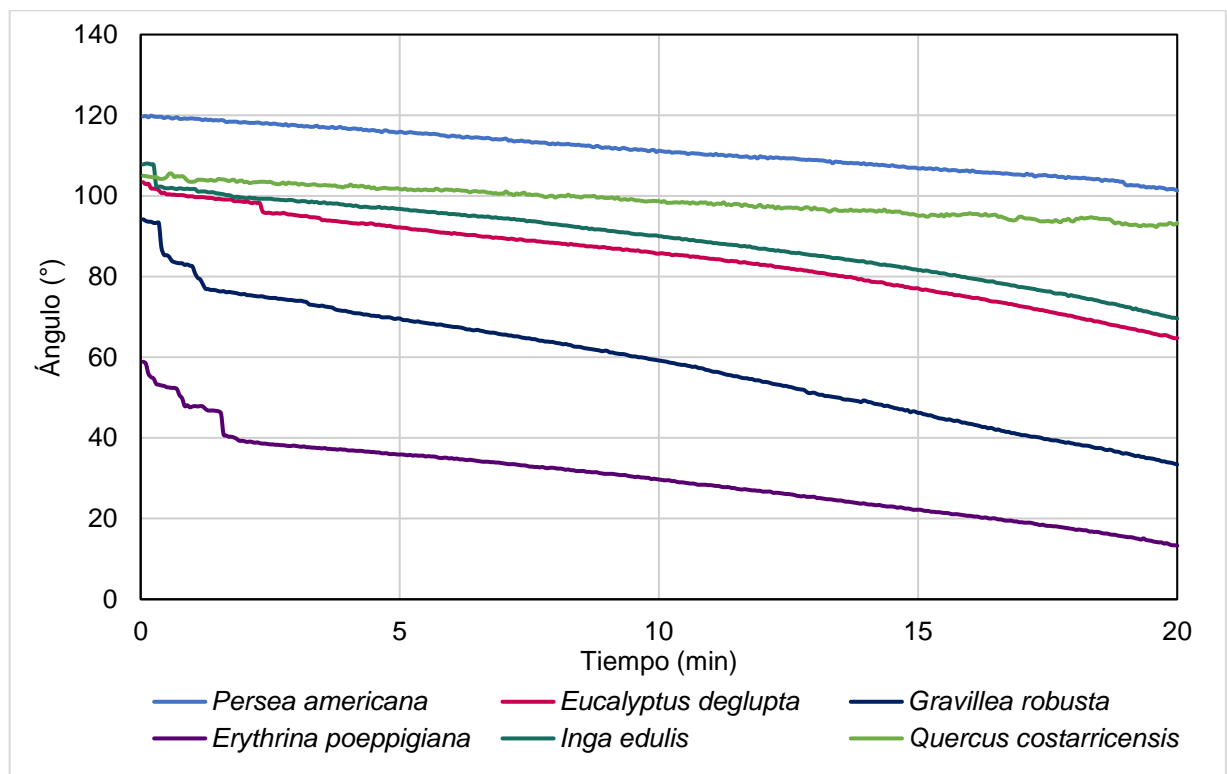


Figura 5. Rango de humectabilidad del carbón vegetal

4 DISCUSIÓN

4.1 Evaluación del proceso de carbonización

Los resultados derivados del proceso de carbonización de las especies de SAF, revelaron que el rendimiento del carbón presentó un promedio de 31,43%; de condensados (líquidos) de 32,74% y de no condensables (gases) de 35,82%. Estos valores son notables y se sitúan dentro de un rango significativo, especialmente al compararlos con especies de plantaciones de rápido crecimiento, donde se observaron rendimientos de carbón entre los 23,88% al 40,73%; los condensados entre 25,6% al 43,7%; y los no condensables de 19,6% al 38,0%, según los datos de Balaguer (2019).

El rendimiento del carbón vegetal se ve influenciado por diversos factores, entre ellos la velocidad de calentamiento, el tamaño del material y el tipo de biomasa, según señalan Mejía & Upegui (2021), de ahí la variación que se presenta entre las diferentes especies (Cuadro 1).

Además, la elevada densidad y el bajo contenido de humedad de la madera seca son factores fundamentales para la obtención de buenos rendimientos y mejorar la calidad del carbón (Amilcar, 2013), ya que, en la caracterización de la materia prima, el contenido de humedad de la madera fue de 12-18% y en la densidad, obtuvo valores entre los 1,71 a 0,34 g/cm³, que según Moya (2007) la madera dura es mayor a 0,8 g/cm³, como fue el caso de la *Inga edulis*, *Persea americana* y *Eucalyptus deglupta*; la madera decorativa en un rango de 0,5 – 0,8 g/cm³, en el caso de la *Grevillea robusta*, y finalmente, la madera suave que es menor a 0,45 g/cm³ como la *Erythrina poeppigiana* con 0,34 g/cm³.

La carbonización de la madera se desarrolla en tres etapas, i) la madera absorbe calor y pierde su humedad en forma de vapor de agua a una temperatura de 110 °C; ii) los volátiles más ligeros se expulsan a partir de 110-270°C y la descomposición térmica se inicia entre 270-400°C, con la liberación del calor y la descomposición continua de forma natural y finalmente, iii) en la etapa de carbonización, la temperatura asciende hasta 400°C (Manatura, 2021). Según la variación de la temperatura con respecto al

tiempo del reactor como se muestra en la figura 2a, se aprecia un aumento constante de la temperatura desde los 0 °C hasta los 100 °C, con la excepción de la Gravilia-1 y el Aguacate-2, donde el incremento comenzó a partir de los 136 °C y 54 °C, respectivamente. Además, se observa que la descomposición térmica tiene lugar en las especies de Aguacate-1, Aguacate-2, Eucalipto-1, Gravilia-1, Gravilia-2 e Inga-1 de los cuales los mayores picos ocurrieron en el rango de 275 a 388 °C. Por otro lado, las especies de Eucalipto-2, Inga-2, Poró-1 y Poró-2 presentaron rangos de temperatura debajo de los 270 °C; con valores específicos de 217 °C, 187 °C, 253 °C respectivamente. Según Manatura (2021), en la última etapa que es la carbonización, la temperatura aumenta hasta los 400 °C, la madera carboniza completamente obteniendo entre un 11,8% a un 26,6% del material alquitranado en productos líquidos. Dicho esto, en comparación con los resultados obtenidos, el material alquitranado de las especies en promedio fue de 10,5% fueron diferentes a los estudios realizados por Manatura (2021).

4.2 Propiedades físicas, mecánicas y energéticas

En cuanto a las propiedades energéticas, se observaron diferencias significativas entre las cenizas y los volátiles entre las especies de SAF y el Quercus. No obstante, en la variable del poder calórico no presentó diferencias significativas entre las especies.

En el mercado del carbón vegetal, la demanda de la calidad es menos rigurosa en el ámbito doméstico. La mayoría de las especificaciones se establecen para el control de la calidad del carbón vegetal en la industria del acero o química. La evaluación de la calidad del carbón vegetal se basa en las propiedades físicas, mecánicas y energéticas (FAO, 1983).

La calidad del carbón está sujeta a regulaciones del mercado europeo y asiático, las cuales se definen mediante normas que incorporan características fisicoquímicas como el color, sonido, facilidad de ignición, sabor, granulometría (Bustamante, 2011). En contraste, en los Estados Unidos de Norteamérica, la calidad se evalúa principalmente en función de la granulación, con especial atención a la prevención de la producción de chispas, presencia de polvo e impurezas (Bustamante, 2011).

Continuando con las propiedades físicas, se observaron diferencias significativas en el contenido de humedad entre las especies de SAF con el Quercus, solo el Quercus y la Gravilia no presentaron diferencias significativas. En general, todas cumplen con los estándares alemanes y europeos, manteniendo un contenido de humedad inferior al 8% (Bautista et al., 2017), ya que los resultados rondan desde los 2,88% hasta los 3,71%, sin contar el Poró, el cual obtuvo un valor de 6,67%. Un menor contenido de humedad en la materia prima inicial contribuye a una mayor calidad del carbón, ya que el poder calórico tiende a disminuir la humedad de la madera (Bautista et al., 2017). En términos generales, resulta preferible mantener contenidos de humedad por debajo del 8%, ya que esto reduce el consumo de material necesario para evaporar el agua (Heya et al., 2014).

El contenido de cenizas en el carbón vegetal representa la fracción inorgánica que no se volatiliza ni se degrada por pirólisis y contiene carbonatos de álcalis, metales alcalinotérreos y metales pesados (Labanya et al., 2022).

Según los estándares internacionales, los valores de materia volátil deben ser $\leq 16\%$, cenizas $\leq 6\%$ y poder calorífico debe superar los 30.000 kJ/kg (De la Cruz, 2020). No obstante, la *Erythrina poeppigiana* fue la única de las especies que presentó mayor cantidad de cenizas (9,9%), este porcentaje de cenizas pueden causar problemas en la utilización en calderas de biomasa, porque la acumulación ensucia los intercambiadores de calor y obstruye el flujo de gases de combustión (Bautista et al., 2017); y un promedio bajo de material volátil con las especies de SAF, registrando un 18%. En contraste, con el *Quercus costaricensis* que presentó un contenido mayor, con un 32,2% de material volátil. El exceso en el contenido de material volátil se atribuye a la heterogeneidad del proceso de carbonización, donde los alquitranes no se volatilizaron por completo durante dicho progreso, según señalan Carrillo et al. (2013).

En investigaciones anteriores, se registraron contenidos de volátiles en el rango de 12,93% a 16,32% para el carbón vegetal, lo cual puede ser asociado con la disolución de algunos compuestos orgánicos presentes en el carbón, tales como algunos

alquitranes solubles en agua, ácido acético (Perdomo et al., 2023). A medida que el contenido volátil aumenta se observa un incremento en el rendimiento, el poder calorífico y la resistencia a la compresión, según lo explicado por Carillo et al. (2013). En comparación con los resultados obtenidos, se evidencia que los rendimientos promedio del carbón, condensables y los no condensables, las cuales alcanzaron el 33,3%. El poder calorífico con 30.173 kJ/kg, y en cuanto a la resistencia a la compresión, se observan valores bajos en las especies de SAF, con la excepción del Eucalipto, que muestra una fuerza aplicada de 1155 N.

De acuerdo con investigaciones anteriores, el *Quercus costaricensis* presentó un contenido de cenizas del 3,5%; contenido de volátiles del 24,5% y un poder calorífico de 28.717 kJ/kg (Beek, 1993). Entonces al comparar con los resultados del presente estudio se tiene que el Quercus obtuvo un contenido de cenizas del 0,89%; contenido de volátiles de 32,21% y un poder calorífico de 28.362,842 kJ/kg.

En lo que respecta al poder calorífico, se refiere a la energía liberada por unidad de masa durante la combustión de un combustible. En este contexto, la humedad desempeña un papel crucial, ya que en una menor cantidad de materia combustible se traduce en una mayor inversión de calor para evaporar el agua. Como en consecuencia, el poder calorífico disminuye, y en temperaturas comprendidas entre 450 y 600 °C, obteniendo un poder calorífico de 7500 kcal/kg, es decir, 31.401 kJ/kg, según señala Pérez (2020), de los cuales comparándolo con el presente estudio donde el Quercus no presentó diferencias significativas entre ellas, con un promedio de 30.173,741 kJ/kg.

Según Valverde et al. (2018), las secciones de los árboles (baja, media y superior) exhiben variaciones en el desarrollo estructural y fisiológico, donde puede variar un 28% en lignina (factor importante en la formación de cenizas), y un 20% en celulosa. Estos componentes se atribuyen al mayor desarrollo y diferenciación del xilema en las secciones superiores donde aún están en fases de crecimiento primario.

4.3 Espectroscopía (FT-IR)

La espectroscopía FTIR se especializa en caracterizar e identificar la presencia de moléculas orgánicas y la estructura de diversas muestras de biomasa (Volli et al., 2021). Los espectros IR consisten en bandas de absorción bastante amplias que se pueden asignar a grupos funcionales específicos de macromoléculas (Rüger et al., 2016).

La espectroscopía infrarroja aprovecha la interacción de la luz infrarroja con enlaces químicos dentro de la muestra, generando bandas únicas asociadas a diferentes grupos funcionales durante el proceso de degradación para evaluar su estructura. Cuando se calientan, los enlaces alifáticos son los primeros en desaparecer debido al fraccionamiento de los alcanos de cadena larga, lo que intensifica la formación de compuestos aromáticos (Ryan et al., 2023).

Según investigaciones adicionales, los espectros de FTIR comúnmente se dividen en dos regiones: la vibración -OH en el rango de 3800-3000 cm^{-1} y la vibración -CH en el rango de 1000-800 cm^{-1} (Yin et al., 2023).

Según la figura 4, se presentó una disminución en la intensidad del pico en 900, 1500, 1800 y 2040, esto está asociado a los grupos CH, CH₂, CH₃ y C=O, C=O y finalmente los picos de CO, respectivamente (Rousset et al. 2011; Ozdemir et al. 2014; Liu et al. 2016; Kaur et al. 2018; Ren et al. 2018).

Además de los estiramientos específicos, como el de la celulosa (3500-3200 cm^{-1}) y el estiramiento CH (3000-2850 cm^{-1}) de la lignina, también se observan estiramientos de C-O (1750-1710 cm^{-1}) relacionados con aldehídos/cetonas/ésteres libres, así como estiramientos de C-C aromático (1680-1600 cm^{-1}), C-C estiramiento aromático de lignina/fenólico/proteína (1500-1475 cm^{-1}), y estiramiento de C-C y C-O/ deformación de carboxilato/lignina carboxílica/fenólica (1470-1426, 1371 cm^{-1}), indicando la presencia de compuestos similares de lignina, hemicelulosa y celulosa (Volli et al., 2021)

El espectro FTIR evidencia la estructura química del carbón vegetal, especialmente los grupos asociados con OH, CH₂, C = O, C-O-C y otros menos relevantes como CH₃. La sección del espectro donde se evidencia la presencia de agua (aproximadamente en el pico 3625 cm⁻¹), se asocia con los grupos hidroxilo (O-H). La señal 2910 cm⁻¹, también relacionada con la pérdida de grupos hidroxilo, estuvo presente en muchas especies, lo que indica la degradación del grupo hidroxilo de carbono (Balaguer-Benlliure et al., 2023).

La señal detectada en la región CO entre 1700 y 1600 cm⁻¹, se vincula con la degradación de la hemicelulosa y la celulosa (1700 cm⁻¹) y la conjugación del enlace CO con los anillos aromáticos (1600-1630 cm⁻¹). La presencia de este pico de CO se atribuye se debe a la deshidrogenación de la madera en lignina y hemicelulosas durante el proceso de carbonización. La disminución en la intensidad del enlace CO indica una mayor deshidratación de la madera, sugiriendo también un aumento en la proporción de átomos de carbono en el mismo rango de temperatura, evidenciando por el inicio de la condensación de los anillos aromáticos (Balaguer-Benlliure et al., 2023).

4.4 Propiedades del carbón vegetal como enmiendas

El carbón vegetal se produce por pirólisis de biomasa bajo oxígeno limitado o ausente y se utiliza como enmienda del suelo para aumentar la fertilidad o secuestrar CO₂ atmosférico, lo que se conoce como biocarbón (Mukherjee et al., 2011).

El pH y la conductividad eléctrica son propiedades del suelo de gran relevancia. El pH indica la acidez o basicidad del suelo al entrar en contacto con el agua, mientras que la conductividad eléctrica proporciona una medida indirecta de la concentración de sales. Si bien la sal disuelta en agua puede ser beneficiosa para los organismos, un exceso de sal puede afectar el crecimiento de las plantas y a la actividad microbiana del suelo, siendo su impacto determinado por diversos factores, como la estructura del suelo y el clima regional (Cremona & Enriquez, 2020).

En este contexto, el *Quercus costaricensis* posee un pH ácido (4,5), diferenciándose significativamente de las especies de SAF que presentan un pH básico. Entre estas últimas, *Persea americana-Eucalyptus deglupta*, y *Grevillea robusta-Inga edulis* son estadísticamente similares, con la excepción de *Erythrina poeppigiana*.

El biocarbón, caracterizado por su alto contenido de carbono, elevada porosidad y extensa área superficial, puede mejorar el pH, la porosidad, la capacidad e intercambio catiónico y, en general, la calidad del suelo (Ren et al., 2023), Este efecto positivo se atribuye a los cationes de sales inorgánicas, como Ca, Fe, Al, Mn, Na y Mg, que constituyen los principales componentes de la madera después de la combustión (Phirom-on & Apiraksakorn, 2022). Los resultados mostraron que las especies de SAF, poseen un pH básico de 10,1; en el caso del Poró, Aguacate-Eucalipto de 8,7, y Gravilia-Inga de 9,1. Estos resultados podrían neutralizar la acidez de los suelos.

La aplicación de biocarbón también influye positivamente en los microorganismos, mejorando la mineralización del nitrógeno orgánico y aumentando el contenido de nitrógeno inorgánico en el suelo (Ren et al., 2023), lo cual esto puede ser estudiado más a fondo para conocer el comportamiento de los microorganismos con respecto a las sales orgánicas constituyentes del carbón mediante las pruebas químicas.

Su resistencia a la descomposición lo convierte en un reservorio a largo plazo de carbono recalcitrante, a diferencia de otras enmiendas derivadas del compostaje y la humidificación (Sumari, 2023), lo cual si los carbonos vegetales estudiados en el presente trabajo son utilizados como enmiendas para el suelo traería estos beneficios.

La temperatura de pirólisis del biocarbón emerge como un factor crucial que afecta sus propiedades. Temperaturas más bajas (<300 °C) disminuyen la conductividad, mientras que temperaturas más altas (>700 °C) reducen los grupos funcionales redox en la superficie, limitando su capacidad de adsorción y mediación en la transferencia de electrones (Nie et al., 2023). Según los datos obtenidos, los carbonos vegetales al estar en una temperatura de 450 °C obtuvieron un rango de conductividad eléctrica de 132,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en Aguacate-Eucalipto-Inga-Quercus, de las cuales no presentaron diferencias significativas entre ellas y 667,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en la Gravilia, de las cuales no

presentan salinidad, mientras que el Poró obtuvo una conductividad eléctrica de 3385,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ la cual se clasifica en moderadamente salina, según (Cremona & Enríquez, 2020). Según los resultados obtenidos en la espectroscopía infrarroja (FTIR), los enlaces alifáticos son los primeros que se eliminaron, dando como resultado a los compuestos aromáticos, además que en la señal 2910 cm^{-1} , de los cuales está asociada al grupo de los hidroxilos, donde también se eliminaron a una temperatura.

La repelencia del agua es el grado de resistencia que opone el suelo al humedecimiento, durante un tiempo de contacto limitado entre él y el agua (Jaramillo & Caballero, 2014). La humectabilidad del suelo se clasifica en cinco categorías: extremadamente repelente al agua, severamente repelente al agua, fuertemente repelente al agua, ligeramente repelente al agua e hidrófila (mojable) (Zhang et al., 2023). Cuando las gotas de agua se filtran en el suelo en más de 3600 s, 3600-600 s, 600-60 s, 60-5 s, dentro de los 5 s, respectivamente. Además, cuando la penetración de gotas de agua superaba los 60 s, el ángulo superaba los 90° (Zhang et al., 2023). Una manera adicional de determinar la repelencia del agua en el suelo es a través del ángulo de contacto, que representa el ángulo formado por el líquido al estar en contacto con la superficie sólida (Rivera, 2015). Si este ángulo supera los 90° , el líquido no se va a extender sobre la superficie, indicando así una naturaleza hidrofóbica; por otro lado, cuando el ángulo de contacto es inferior a 90° , el material se considera hidrofílica (Rivera, 2015).

Otra forma de establecer la repelencia del agua al suelo es el ángulo del contacto que se refiere al ángulo que forma el líquido en contacto con la superficie sólida, cuando el ángulo es mayor a 90° el líquido no se extiende sobre la superficie sólida, es decir, es hidrofóbico, cuando el ángulo de contacto es menor a 90° el material es hidrofílico (Rivera, 2015). En el caso de las especies utilizadas, el ángulo inicial del Aguacate-Eucalipto-Inga-Quercus presentaron un ángulo mayor a 90° , después de los 20 minutos, su ángulo final fue de 103° , 65° , 77° y 78° , respectivamente. Siendo el Aguacate la única hidrofoba.

Finalmente, el ángulo inicial de las especies de Gravilia y el Poró presentaron un ángulo inicial menor a 90° , al igual que el ángulo final después de los 20 minutos, siendo éstas hidrofílicas.

5 CONCLUSIONES

En resumen, el estudio revela que el *Quercus costaricensis* presentó diferencias significativas, en cuanto a la resistencia a la compresión, el contenido de volátiles, cenizas y pH de todas las especies de SAF. Mientras que, el *Quercus costaricensis* presentó diferencias significativas específicamente con la *Grevillea robusta* y *Erythrina poeppigiana* en las pruebas de conductividad eléctrica,

En el pH del carbón, se destaca que las especies utilizadas en SAF presentan un pH básico, a diferencia del *Quercus costaricensis*, que muestra un pH ácido. Con esta información, las especies de SAF podrían corregir los suelos ácidos comunes en Costa Rica y así mejorar el suelo y el rendimiento de los cultivos agroforestales, forestales e inclusive agrícolas.

En el caso de la conductividad eléctrica, se revela que la *Persea americana*, *Eucalyptus deglupta*, *Inga edulis*, *Quercus costaricensis* y la *Grevillea robusta*, se encuentran en un rango no salino, mientras que la *Erythrina poeppigiana* se sitúa en un rango moderadamente salino. Eso quiere decir, que para las primeras cinco especies se ocuparía mayor cantidad de fertilizante o de riego, para la *Erythrina poeppigiana* podrían existir una moderada cantidad de nutriente para el suelo (Cremona & Enriquez, 2020).

Por lo general, las especies de SAF están dentro de los estándares internacionales del mercado y presentan las mismas propiedades que el carbón de *Quercus* que anteriormente era ampliamente utilizado en Costa Rica para el mercado local en la producción del carbón como poder calorífico. Sin embargo, un aspecto negativo es la baja resistencia a la compresión de las especies, lo cual trae implicaciones en transporte dando como resultado que el carbón de las especies de SAF sea más quebradizo, sin embargo, el Poró tiene una textura adecuada para los tratamientos como enmiendas.

6 RECOMENDACIONES

- Llevar a cabo investigaciones con diferentes temperaturas de pirólisis con el fin de comparar la calidad del carbón vegetal de las especies utilizadas en este estudio.
- Incorporar otras especies en estudios más extensos para realizar comparaciones significativas.
- Realizar investigaciones sobre enmiendas en el suelo para verificar la eficacia del carbón como mejorador en plantaciones forestales, agrícolas y sistemas agroforestales.
- Evaluar el rendimiento del carbón vegetal en laboratorio en relación con las carboneras, con el objetivo de entender la eficiencia de ambos sistemas.
- Analizar los costos asociados a la producción de carbón vegetal para determinar su viabilidad en términos de poder calorífico y su potencial en el mercado.

7. REFERENCIAS

- Abid, I., Benlemlih, M., El Ouadghiri, I., Peillex, J., Urom, C. (2023). Fossil fuel divestment and energy prices: Implication for economic agents. *Journal of Economic Behavior and Organization*. 214, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2023.07.033>
- Adetona, A. B., & Layzell, D. B. (2023). Diverting residual biomass to energy use: Quantifying the global warming potential of biogenic CO₂ (GWP_{bCO₂}). *GCB Bioenergy*, 15(5), 697–709. <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1111/gcbb.13048>
- Ayala-Mendivil, A., Sandoval, G. (2018). Bioenergía a partir de residuos forestales y madera. *Madera bosques*, vol. 24. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401877>
- Bachmann, J., Horton, R., Van Der Ploeg, R.R. and Woche, S., 2000. Modified sessile drop method for assessing initial soil–water contact angle of sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2), pp.564-567. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642564x>
- Bachmann, J., Horton, R., Van Der Ploeg, R.R. and Woche, S., 2000. Modified sessile drop method for assessing initial soil–water contact angle of sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2), pp.564-567. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642564x>
- Balaguer-Benlliure, V., Moya, R & +Gaitán-Alvarez, J (2023) Physical and Energy Characteristics, Compression Strength and Chemical Modification of Charcoal Produced from Sixteen Tropical Woods in Costa Rica, *Journal of Sustainable Forestry*, 42:2, 151-169, <https://doi.org/10.1080/10549811.2021.1978096>
- Balaguer-Benlliure, V., Moya, R & Gaitán-Alvarez, J. (2023). Physical and Energy Characteristics, Compression Strength and Chemical Modification of Charcoal Produced from Sixteen Tropical Woods in Costa Rica, *Journal of Sustainable Forestry*, 42:2, 151-169, DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2021.1978096>

- Bautista, U., Ruiz, F., Santiago, W, & Santiago, W. (2017). Evaluación de la calidad del carbón vegetal elaborado a partir de madera de encino en horno de ladrillo. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*. Vol. 4 (2): 127-137
- Beek, N. (1993). Técnicas de Producción y calidad del carbón vegetal en los robledales de altura de Costa Rica. CATIE, Turrialba (Costa Rica). Programa Manejo Integrado de Recursos Naturales. Proyecto Silvicultura de Bosques Naturales. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/4184>
- Bose, T., Vivas, M., Slippers, B., Roux, J., Kemler, M., Begerow, D., Witfeld, F., Brachmann, A., Dovey, S., & Wingfield, M. J. (2023). Retention of post-harvest residues enhances soil fungal biodiversity in Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management*, 532, 120806. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120806>
- Bustamante, G. (2011). Evaluación del proceso de producción de carbón vegetal de residuos de *Quercus sideroxyla* Humb & Bonpl., en hornos tipo colmena brasileño [Posgrado, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Colección digital UANL <https://cd.dgb.uanl.mx/handle/201504211/5072>
- Carrillo-Parra, A, Foroughbakhch-Pournavab, R, & Bustamante-García, 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 mexicana de ciencias forestales*, 4(17), 62-71. Recuperado en 02 de noviembre de 2023, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322013000300007&lng=es&tlng=es
- Cessa-Reyes, V., Ruiz-Rosado, O., & Armida-Alcudia, L. (2020). The Coffee Agroforestry System in Mexico. *Agro Productividad*, 13(11), 45–51. <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.32854/agrop.v13i11.1811>
- Chañi, Y & Rengifo, J. (2017). Evaluación el rendimiento y calidad del carbón vegetal, a apartir de residuos de la especie *Dypterix odorata* producidos en el horno

- artesanal de aserrín tipo horizontal, Tambopata-Madre de Dios. Tesis de pregrado Repositorio UNAMAD. <http://hdl.handle.net/20.500.14070/247>
- Cremona, María & Enriquez, A. (2020) Algunas propiedades del suelo que condicionan su comportamiento: El pH y la conductividad eléctrica; Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria; Presencia; 73; 7-2020; 5-8 <http://hdl.handle.net/11336/209253>
- da Costa, T. P., Murphy, F., Roldan, R., Mediboyina, M. K., Chen, W., Sweeney, J., Capareda, S., & Holden, N. M. (2023). Technical and environmental assessment of forestry residues valorisation via fast pyrolysis in Ireland. *Biomass and Bioenergy*, 173, 106766. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106766>
- De la Cruz, C., Herrera, J., Ortiz, I., Ríos, J., Rosales, R., Carillo-Parra, A. (2020). Caracterización energética del carbón vegetal producido en el Norte-Centro de México. *Madera y bosques* 26 (2) <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621971>
- Deacon, N. J., & Cavender-Bares, J. (2015). Limited Pollen Dispersal Contributes to Population Genetic Structure but Not Local Adaptation in *Quercus oleoides* Forests of Costa Rica. *PLoS ONE*, 10(9), 1–25. <https://doi.org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1371/journal.pone.0138783>
- Ercan, B., Alper, K., Ucar, S., & Karagoz, S. (2023). Comparative studies of hydrochars and biochars produced from lignocellulosic biomass via hydrothermal carbonization, torrefaction and pyrolysis. *Journal of the Energy Institute*, 109, 101298. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101298>
- FAO. (1983). Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Capítulo 10. Uso eficiente del carbón vegetal. FAO MONTES/41. Roma, Italia. 178 p
- Gallo, N., Gutiérrez, E., Torres G., Villavicencio, Á. (2018). Caracterización energética del lechuguín y pasto alemán con 100%, 50% y 25% de humedad utilizando la bomba calorimétrica adiabática. *Aporte Santiaguino* 11(1): 31-42. <http://dx.doi.org/10.32911/as.2018.v11.n1.454>

- Garvie, L. C., Roxburgh, S. H., & Ximenes, F. A. (2021). Greenhouse Gas Emission Offsets of Forest Residues for Bioenergy in Queensland, Australia. *Forests*, 12(11). <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.3390/f12111570>
- Guangasig Morocho, C. (2022). Obtención y caracterización de Biochar a partir de residuos de palma africana mediante pirólisis. [Trabajo de grado, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio Digital. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/28386>
- Guo, H., Qin, X., Cheng, S., Xing, B., Jiang, D., Meng, W., & Xia, H. (2023). Production of high-quality pyrolysis product by microwave–assisted catalytic pyrolysis of wood waste and application of biochar. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(8), 104961. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104961>
- Gutiérrez, A & García, J. (2021). Fuentes de energía renovable, recursos energético distribuidos y almacenamiento en Colombia: Una revisión de la Normatividad (Renewable Energy Sources, Distributed Energy Resources and Energy Storage in Colombia: A Review of Regulation) SSRN <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3768871>
- Heya, M., Foroughbakhch, R., Carrillo-Parra, A & Colin-Urieta. S. (2014). Bioenergy potential of shrub from native species of northeastern Mexico. *International Journal of Agricultural Policy and Research* 2(12): 475-483. <http://dx.doi.org/10.15739/IJAPR.020>
- Hyde, W. F., Olmos, V. M., Robalino, J., da Gama e Silva, Zenobio Abel Gouvêa Perelli, Susaeta, A., & Yin, R. (2022). Latin America: A regional perspective on its forest policy and economics. *Forest Policy and Economics*, 141, 102760. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102760>
- Jaramillo J, D & Caballero, B. (2014). Variabilidad espacial del grado de repelencia al agua en un andisol de antioquia bajo cobertura de pinus patula. *Revista Politécnica*, 10(18), 47–55 <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/375>

- Kaur, V., Kaur, B., Kaur, K., Kaur, M., & Kaur, S. (2018). Preparation and Characterisation of Charcoal Material Derived from Bamboo for the Adsorption of Sulphur Contaminated Water. *London Journal of Research in Science: Natural and Formal LJP Copyright ID*, 18(2), 824557.
- Labanya, R., Srivastava, P. C., Pachauri, S. P., Shukla, A. K., Shrivastava, M., & Srivastava, P. (2022). Effect of three plant biomasses and two pyrolysis temperatures on structural characteristics of biochar. *Chemistry & Ecology*, 38(5), 430–450. <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1080/02757540.2022.2075858>
- Li, W., Tian, Y., Liu, C., Yang, R., Jin, Y., & Li, T. (2023). Biochar Application: A Viable and Pyrolysis Temperature Dependent Option for Enhancing Leaf Secondary Metabolites of *Cyclocarya paliurus*. *Forests*, 14(7). <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.3390/f14071298>
- Liu, Z., Huang, Y., & Zhao, G. (2016). Preparation and Characterization of Activated Carbon Fibers from Liquefied Wood by ZnCl₂ Activation. *BioResources*, 11(2), 3178–3190. <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.3178-3190>
- Madrigal, S. A. M., & Sosa, S. A. U. (2021). La pirolisis y otros métodos para el aprovechamiento de residuos de neumáticos como fuente de energía para la industria. Una revisión. *Cuad. Acvtiva*, 13, 41-60.
- Manals-Cutiño, E, Penedo-Medina, M, & Giralt-Ortega, . (2011). ANÁLISIS TERMOGRAVIMETRICO Y TÉRMICO DIFERENCIAL DE DIFERENTES BIOMASAS VEGETALES. *Tecnología Química*, 31(2), 180-190. Recuperado en 03 de noviembre de 2023, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852011000200005&lng=es&tlng=es.
- Manatura, K. (2021). Novel performance study of recirculated pyro-gas carbonizer for charcoal production. *Energy for Sustainable Development*, 64, 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.07.002>

- Marín Cabrera, M. (2022). Social networks in wildlife protected areas of Costa Rica. *Uniciencia*, 36(1), 1-17. <https://doi.org/10.15359/ru.36-1.6>
- Masís-Meléndez, F., Segura-Chavarría, D., García-González, C.A., Quesada-Kimsey, J. and Villagra-Mendoza, K., 2020. Variability of physical and chemical properties of TLUD stove derived biochars. *Applied Sciences*, 10(2), p.507. <https://doi.org/10.3390/app10020507>
- Masís-Meléndez, F., Segura-Chavarría, D., García-González, C.A., Quesada-Kimsey, J. and Villagra-Mendoza, K., 2020. Variability of physical and chemical properties of TLUD stove derived biochars. *Applied Sciences*, 10(2), p.507. <https://doi.org/10.3390/app10020507>
- Mondragón, F. (2021). Ciclos del dióxido de carbono en la formación y utilización de combustibles fósiles y su efecto en el cambio climático. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 45(176), 833–849. <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.18257/raccefyn.1364>
- Mukherjee, A., Zimmerman, A.R. and Harris, W., 2011. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*, 163(3-4), pp.247-255. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.021>
- Mukherjee, A., Zimmerman, A.R. and Harris, W., 2011. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*, 163(3-4), pp.247-255. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.021>
- Muthuri, C. W., Kuyah, S., Njenga, M., Kuria, A., Öborn, I., & van Noordwijk, M. (2023). Agroforestry's contribution to livelihoods and carbon sequestration in East Africa: A systematic review. *Trees, Forests and People*, 14, 100432. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100432>
- Nie, W., He, S., Lin, Y., Cheng, J. J., & Yang, C. (2023). Functional biochar in enhanced anaerobic digestion: Synthesis, performances, and mechanisms. *Science of the Total Environment*, 906, 167681. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167681>

- Oberleitner, F., Egger, C., Oberdorfer, S., Dullinger, S., Wanek, W., & Hietz, P. (2021). Recovery of aboveground biomass, species richness and composition in tropical secondary forests in SW Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 479, 118580. [10.1016/j.foreco.2020.118580](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118580)
- Ovalle-Rivera, O., Van Oijen, M., Läderach, P., Roupsard, O., de Melo Virginio Filho, E., Barrios, M., & Rapidel, B. (2020). Assessing the accuracy and robustness of a process-based model for coffee agroforestry systems in Central America. *Agroforestry Systems*, 94(5), 2033–2051. <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1007/s10457-020-00521-6>
- Ozdemir, I., Şahin, M., Orhan, R., & Erdem, M. (2014). Preparation and characterization of activated carbon from grape stalk by zinc chloride activation. *Fuel Processing Technology*, 125, 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.04.002>
- Perdomo, L., Perdomo González, L., Quintana, R., Rodríguez, M., Martín, A., Hernández, L. (2023). Obtención y caracterización preliminar el polvo de carbón vegetal de Marabú para su uso en consumibles de soldadura. *Centro Azúcar*. 50 (2).
- Perez, J. 2020. Efecto del contenido de humedad en los residuos de la madera aserrada de capirona (*Calycophyllum spruceanum* Benth); con el poder calorífico del carbón vegetal producido en el prototipo del proyecto [Posgrado, Universidad Nacional de Ucayali] Repositorio institucional <http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/4546>
- Phirom-on, K., & Apiraksakorn, J. (2022). Eco-friendly extraction of banana peel cellulose using a wood charcoal ash solution and application of process wastewater as a naturally-derived product. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101174. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101174>
- Pico-Mendoza, J., Pinoargote, M., Carrasco, B., & Limongi Andrade, R. (2020). Ecosystem services in certified and non-certified coffee agroforestry systems in

- Costa Rica. *Agroecology & Sustainable Food Systems*, 44(7), 902–918.
<https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1080/21683565.2020.1713962>
- Qin, X., Cheng, S., Xing, B., Qu, X., Shi, C., Meng, W., Zhang, C., & Xia, H. (2023). Preparation of pyrolysis products by catalytic pyrolysis of poplar: Application of biochar in antibiotic wastewater treatment. *Chemosphere*, 338, 139519.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139519>
- Razzaghi, S., Islam, K. R., & Ahmed, I. A. M. (2022). Deforestation impacts soil organic carbon and nitrogen pools and carbon lability under Mediterranean climates. *Journal of Soils and Sediments*, 22(9 pp.2381–2391), 2381–2391. <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.1007/s11368-022-03244-6>
- Ren, T., Fan, P., Zuo, W., Liao, Z., Wang, F., Wei, Y., Cai, X., & Liu, G. (2023). Biochar-based fertilizer under drip irrigation: More conducive to improving soil carbon pool and promoting nitrogen utilization. *Ecological Indicators*, 154, 110583.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110583>
- Ren, X., Cai, H., Chang, J., & YongMing, F. (2018). TG-FTIR Study on the Pyrolysis Properties of Lignin from Different Kinds of Woody Biomass. *Paper and Biomaterials*, 3, 1–7.
- Rivera, C. (2015). Alteraciones de la materia orgánica y la repelencia del suelo al agua en una zona afectada por incendios forestales en parte de la microcuenca del Saloya. [Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito] Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana.
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/9134>
- Rousset, P., Figueiredo, C., De Souza, M., & Quirino, W. (2011). Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach. *Fuel Processing Technology*, 92(10), 1890–1897. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.05.005>
- Rüger, J., Unger, N., Schie, I. W., Brunner, E., Popp, J., & Krafft, C. (2016). Assessment of growth phases of the diatom *Ditylum brightwellii* by FT-IR and Raman

- spectroscopy. *Algal Research*, 19, 246-252.
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.09.007>
- Ryan, R., Dosseto, A., Lemarchand, D., Dlapa, P., Thomas, Z., Simkovic, I., & Bradstock, R. (2023). Boron isotopes and FTIR spectroscopy to identify past high severity fires. *Catena*, 222, 106887.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106887>
- Salazar Vega, D. I. (2022). Caracterización del proceso de polimeración de la resina DGEBA utilizando análisis Termogravimétrico (TGA) Y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).
- Shen, Y., & Yuan, R. (2021). Pyrolysis of agroforestry bio-wastes with Calcium/Magnesium oxides or carbonates – Focusing on biochar as soil conditioner. *Biomass and Bioenergy*, 155, 106277.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106277>
- Sumari, C. (2023). Caracterización y toxicidad del biochar obtenido a partir de la pirólisis de cascarilla de arroz, pergamino de café y restos de poda de arándano.
<https://doi.org/10.21142/tl.2023.2737>
- Sun, S., Wang, Q., Wang, X., Wu, C., Zhang, X., Bai, J., & Sun, B. (2023). Dry torrefaction and continuous thermochemical conversion for upgrading agroforestry waste into eco-friendly energy carriers: Current progress and future prospect. *Science of the Total Environment*, 905, 167061.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167061>
- Valverde, J. C., Arias, D., Campos, R & Guevara, M. (2018). Caracterización física y química del carbón de tres segmentos de fuste y ramas de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. proveniente de plantaciones dendroenergéticas. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 15(Suppl. 1), 16-24. Epub July 19, 2019.
<https://dx.doi.org/10.18845/rfmk.v15i1.3774>
- Volli, V., Gollakota, A. R. K., & Shu, C. (2021). Comparative studies on thermochemical behavior and kinetics of lignocellulosic biomass residues using TG-FTIR and Py-

- GC/MS. *Science of the Total Environment*, 792, 148392. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148392>
- Xiu, L., Gu, W., Sun, Y., Wu, D., Wang, Y., Zhang, H., Zhang, W., & Chen, W. (2023). The fate and supply capacity of potassium in biochar used in agriculture. *Science of the Total Environment*, 902, 165969. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165969>
- Yin, M., Bi, D., Zhao, W., Liu, J., Zhao, A., & Jiang, M. (2023). Production of bio-oil and biochar by the nitrogen-rich pyrolysis of cellulose with urea: Pathway of nitrile in bio-oil and evolution of nitrogen in biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 174, 106137. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106137>
- Yu Hu, Pei-yuan Li, Yuan-ping Yang, Meng Ling, & Xian-fa Li. (2022). Preparation and Characterization of Biochar from Four Types of Waste Biomass under Matched Conditions. *BioResources*, 17(4), 6464–6475. <https://doi-org.ezproxy.itcr.ac.cr/10.15376/biores.17.4.6464-6475>
- Zhang, Q., Chen, W., & Chu, J. (2023). Effect of soil hydrophobicity on soil-water retention curve of a silt loam soil. *Soil and Tillage Research*, 234, 105855. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105855>