

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Caracterización química y eléctrica de carbón hidrotermal producido a partir de residuos de cacao y banano para potencial aplicación industrial**

**Susan Kelly Yépez Hinojosa**

**Ingeniería Química**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniería Química

Quito, 26 de julio de 2022

# **UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

## **HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Caracterización química y eléctrica de carbón hidrotermal producido a partir de residuos de cacao y banano para potencial aplicación industrial**

**Susan Kelly Yépez Hinojosa**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Andrea Carolina Landázuri, PhD**

**Lourdes Orejuela-Escobar, PhD**

Quito, 26 de julio de 2022

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Susan Kelly Yépez Hinojosa

Código: 00112485

Cédula de identidad: 0401376983

Lugar y fecha: Quito, 28 de julio de 2022

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

## RESUMEN

Actualmente, se busca alternativas para el aprovechamiento de la biomasa residual, con el menor impacto posible. Una alternativa consiste en someter a la biomasa residual a procesos de tratamiento hidrotermal para su carbonización. Este tratamiento de carbonización hidrotermal (HTC, por sus siglas en inglés) es considerado “neutro en carbono”, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y a la reducción del impacto ambiental. Debido a que la materia prima es materia orgánica renovable y se realiza con bajo consumo de energía, se considera un tratamiento sostenible aconsejable para el manejo de biomasa residual líquida o sólida. En el presente trabajo se plantea el uso del proceso HTC utilizando cáscaras de cacao y banano. El producto sólido generado, hidrochar, es un material nanoestructurado que posee excelentes características como material adsorbente, y por ende utilizado en áreas como la agricultura para remediación de suelos desgastados, en tratamiento de aguas para remoción de ciertos contaminantes, entre otras aplicaciones. Particularmente, en este estudio, se evalúan las propiedades químicas y dieléctricas de los materiales nativos y de los hidrochars producidos a dos temperaturas y tres rangos de tiempo. Los resultados sugieren que el cacao es un material que posee más características capacitivas (almacena carga eléctrica) que lo que significa que puede ser una alternativa ecológica a los materiales usados comúnmente en la industria electrónica de consumo.

**Palabras clave:** hidrochar, permitividad relativa, biomasa residual, microelectrónica, capacitancia, carbonización hidrotermal.

## ABSTRACT

Currently, several alternative methods are sought for the use of residual biomass, with the least possible impact. An alternative consists of subjecting the residual biomass to hydrothermal treatment processes for its carbonization. This hydrothermal carbonization (HTC) treatment is “carbon neutral”, contributing thus to the mitigation of climate change and the reduction of environmental impact. Due to the fact that the raw material is renewable organic matter and it is carried out with low energy consumption, it is considered an advisable sustainable treatment for the management of residual liquid or solid biomass. In the present work, cocoa pod husks and ripe banana peels were subjected to HTC treatments. The solid product generated, hydrochar, is a nanostructured material that has excellent characteristics as an adsorbent material, and is therefore used in areas such as agriculture for the remediation of soil, in water treatment for the removal of certain contaminants, among other applications. Particularly in this study, the chemical properties and dielectric properties of two native materials and hydrochars, from ripe banana peels and cocoa pod husks, are evaluated as a function of temperature and time. The results suggest that cocoa pod husks hydrochar is a material that has more capacitive characteristics (it stores electrical) which means that it can be an ecological alternative to materials commonly used in the consumer electronics industry.

**Key words:** hydrochar, relative permittivity, residual biomass, microelectronics, capacitance, hydrothermal carbonization.

## TABLA DE CONTENIDO

Agradecimientos .....	10
1. Introducción .....	11
2. Metodología .....	15
2.1 Descripción de la biomasa residual y su acondicionamiento .....	15
2.2 Análisis Proximal del Material Nativo .....	15
2.2.1 Cenizas .....	15
2.2.2 Humedad .....	16
2.2.3 Proteína .....	16
2.2.4 Grasa .....	17
2.3 Determinación de Carbono Orgánico Total y Nitrógeno total.....	17
2.3.1 Determinación de Carbono Orgánico Total .....	17
2.3.2 Determinación de Nitrógeno total.....	18
2.4 Carbonización Hidrotermal .....	18
2.5 Caracterización Por Espectroscopia Infrarroja Con Transformada De Fourier (FTIR) .....	20
2.6 Caracterización Electrónica.....	20
3. Resultados y Discusiones .....	21
3.1 Análisis Proximal, carbono orgánico total y nitrógeno total .....	21
3.2 Caracterización Por Espectroscopia Infrarroja (FTIR) .....	25
3.3 Caracterización Por Espectroscopia Infrarroja (FTIR) .....	27
3.3.1 FTIR-Banano.....	27
3.3.2 FTIR-Cacao .....	29
3.4 Determinación de la permitividad relativa (constante dieléctrica) .....	31
3.5 Relación entre el contenido de carbono y constante dieléctrica.....	35
5. Conclusiones.....	37
Referencias bibliográficas.....	38
Anexo A: Material Nativo e Hidrochar .....	40
Anexo B: Equipos.....	42
Anexo C: Proceso de Pastillaje.....	43

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Resultados del análisis proximal de cáscaras de cacao y banano .....	21
<b>Tabla 2.</b> Resultados del análisis de carbono orgánico total y nitrógeno en cáscara de banano nativo hidrochar 6h. ....	23
<b>Tabla 3.</b> Resultados del análisis de carbono orgánico total y nitrógeno en cáscara de cacao nativo e hidrochar 6h. ....	23
<b>Tabla 4.</b> Resultados de los valores de permitividad relativa de hidrochars en 150° C y 210° C .....	34



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama de bloque de la elaboración de Hydrochar a partir de residuos agroindustriales. ....	19
<b>Figura 2.</b> Graficas de rendimiento de a) carbón orgánico total y b) nitrógeno total de hidrochars de cáscaras de banano y cacao 6h. ....	24
<b>Figura 3.</b> Diagrama de barras comparación de porcentaje de peso obtenido de la de cáscara de banano después del proceso hidrotermal a diferentes horas .....	25
<b>Figura 4.</b> Diagrama de barras comparación de porcentaje de peso obtenido de la cáscara de cacao después del proceso hidrotermal a diferentes temperaturas.....	26
<b>Figura 5.</b> Espectros FTIR de cáscara de banano nativo e hidrochars a (a)150°C y (b) 210°C a diferentes tiempos de tratamiento HTC. ....	28
<b>Figura 6.</b> Espectros FTIR de cáscara de cacao nativo e hidrochars a (a)150°C y (b) 210°C a diferentes tiempos de tratamiento HTC. ....	29
<b>Figura 7.</b> Permitividad relativa de biomasa nativa e hidrochars de cáscara de banano sometidos a HTC a a) 150°C y b )210°C versus frecuencia (rango de 10 MHz a 1 GHz).....	33
<b>Figura 8.</b> Permitividad relativa de biomasa nativa e hidrochars de cáscara de cacao sometidos a HTC a a) 150°C y b) 210°C versus frecuencia (rango de 10 MHz a 1GHz) .....	33

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por todo lo que tengo en mi vida y todo lo que he vivido, pues eso me ha hecho la mujer que soy el día de hoy. A mis padres, hermanos y toda mi familia por brindarme su apoyo y confianza en todo momento durante estos años, incluyendo a quienes se han convertido en ángeles y desde allá arriba han bendecido e iluminado mi camino. A mi hijo Nicolás por darme el valor y los motivos para ser mejor cada día.

Un agradecimiento especial a todos quienes conforman el grupo de investigación GICAS, a los estudiantes e investigadores que cada día me acompañaron y con quienes he compartido alegrías y tristezas durante mi investigación, pero sobre todo a sus coordinadoras, Andrea Landázuri PhD y Lourdes Orejuela PhD, por guiarme y compartir todos sus conocimientos conmigo. A todo el grupo de investigación grupo IMNE y al departamento Ingeniería Química de la Universidad San Francisco de Quito por todas las enseñanzas y experiencias allí aprendidas.

Finalmente, a mis mejores amigas Jessy y Anny que nunca han dejado de motivarme para alcanzar esta meta y en general a todas las personas que me han apoyado, acompañado y enseñado durante este viaje que se llama vida y en los últimos años de mi carrera.

## 1. INTRODUCCIÓN

La agroindustria del banano y cacao en Ecuador son reconocidas a nivel mundial por tener productos de alta calidad y por ser un producto atractivo para el consumidor. Ecuador es líder en la producción de cacao para exportación a diferentes regiones ubicado dentro de los 8 los principales exportadores (Campos-Vega et al., 2018) , este producto es usado principalmente como materia prima para la elaboración de productos alimenticios como: barras de chocolate, nibs de cacao, chocolate en polvo y manteca de cacao. Las cáscaras de cacao al no tener un uso industrial son tratados como desecho común, y no entran en la cadena de valor de las empresas del sector. De igual forma, el banano ecuatoriano es uno de alimentos más aceptados en el mercado internacional. El producto que no se exporta es considerado rechazo y se comercializa en los mercados locales y son usados en la industria o como alimento animal y la mayor cantidad se desperdicia en las fincas (Astudillo, 2015). Cabe destacar que el banano una vez consumida la fruta la cascara se considera desecho y no es aprovechado ni recibe un buen manejo.

La cantidad de desechos de banano generados anualmente en nuestro país es alrededor de 3 millones de toneladas y cacao es aproximadamente de 2 millones de toneladas (Echeverria, 2021) las cuales hasta el momento no tienen ningún uso industrial o son usados como materia prima para la elaboración de abono o como alimento para animales (Aguilar, 2019). El no darle un valor agregado trae como consecuencia su acumulación y por ende una pérdida económica al no usar todos los elementos de la fruta.

Los residuos agroindustriales contienen en su composición química una variedad de compuestos útiles, algunos de los cuales actualmente se consiguen solo de fuentes fósiles, en tanto que la biomasa residual es considerada una fuente de materia

prima renovable (Orejuela-Escobar et al., 2021) por lo tanto es una alternativa para evitar la subutilización de los residuos agroindustriales y a través de química y procesos verdes que promuevan la innovación sostenible y la obtención de nuevos materiales. El desarrollo de los llamados materiales verdes es importante debido a su utilidad y sobre todo la necesidad existente de reducir los daños al medio ambiente, debido a los desechos y contaminación que se generan (Bhavani et al., 2022). A pesar de que actualmente existen algunos trabajos en donde se usan estos residuos como en la elaboración de alimentos de animales, bio-oil, etanol, producción de té, entre otros; las cantidades de cáscaras generadas es mayor y es importante buscar aún más aplicaciones para estos residuos (Moreira, 2013) para que su cantidad disminuya y se obtenga un beneficio de la misma.

Con el fin de mejorar esta problemática, se ha visto la necesidad de desarrollar otros métodos como la producción de hidrochar mediante tratamientos hidrotérmicos, que permiten la valorización de los residuos biomásicos y la utilización eficiente de los recursos biológicos; aplicando así el concepto de Bioeconomía Circular e Ingeniería Circular (Orejuela-Escobar et al., 2021). Se utiliza el proceso de carbonización hidrotermal para darle un mayor valor agregado a los desechos de cacao y banano para desarrollar la Bioeconomía Circular en el país y encontrar nuevas aplicaciones industriales a los biocarbones (Erazo & Pazmiño, 2021)

El hidrochar o también llamado carbón hidrotermal, es el resultado sólido del proceso de carbonización hidrotermal, proveniente del material lignocelulósico y con un alto contenido de carbono (Domínguez, 2018). La creciente cantidad de aplicaciones de hidrochar también han aumentado el interés en su producción y desarrollo (Cervera, 2020). El proceso de carbonización hidrotermal le otorga al material otras características que lo vuelven muy útil en diferentes industrias: ambiental, como carbón activado y

catalizador (Domínguez, 2018) y agrícolas para captura de oxígeno, por su porosidad y capacidad de adsorción mejora la calidad de la tierra (Pacheco & Vilela, 2017). Las ventajas del tratamiento de carbonización hidrotermal es que permite mejorar las características de la biomasa, sin la utilización de reactivos tóxicos ni un alto consumo energético. (Muñoz et al., s/f)

Un área emergente de estudio del hidrochar es como material nanoestructurado, con uso en la industria ambiental es utilizado en el tratamiento de aguas residuales en plantas (García & Pérez, 2019) El uso del hidrochar como bio nano adsorbente y bio nano catalizador para eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos del agua (Omran & Baek, 2022). Así mismo, la adsorción de metales pesados como el plomo y otros elementos que se encuentran dispersos en efluentes de agua. También se encuentra dentro de la nanoelectrónica y semiconductores para usarse como potencial dispositivo para almacenamiento de energía (Laverde et al., 2019)

Este trabajo se centra en el proceso de carbonización hidrotermal de residuos agroindustriales de cáscaras de banano y de cacao y su utilización en microelectrónica por sus características dieléctricas y posibles semiconductores. Este proyecto promueve, el aprovechamiento de biomasa residual mediante el tratamiento considerado “neutro en carbono” y por ende contribuyendo a la mitigación del cambio climático y a la reducción del impacto ambiental de dicha industria. Los semiconductores son materiales que tienen características específicas que les permite actuar como conductor o aislante. Son elaborados frecuentemente con materiales como oxido de silicio o aleaciones con cadmio y germanio, lo que resulta costoso y altamente contaminante (Lin & Choong, 2021). El uso de hidrochar, en microelectrónica, despierta el interés por las características eléctricas que posee el material como la capacitancia, conductancia, resistencia a la electricidad, entre otras; reduciría no solo el costo en su elaboración,

sino que es considerada una industria altamente contaminante. El hidrochar tiene aplicaciones dentro de la microelectrónica y la electrónica de consumo. Es así que

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es evaluar y correlacionar resultados de caracterización química y eléctrica de los residuos seleccionados de cáscaras banano y cacao en sus formas nativas y como hidrochar para potenciales aplicaciones con énfasis en las micro y nanoelectrónica. Para esto se produce hidrochars a partir de residuos agroindustriales de cáscara de banano y cacao a dos temperaturas (150°C y 210°C) durante el tratamiento HTC y a tres horas (2 h, 4 h, 6 h) de tratamiento. Este es un proyecto pionero de colaboración entre el Grupo de Ingeniería Circular Aplicada & Simulación (GICAS) y el Instituto de Micro y Nanoelectrónica (IMNE) de la USFQ.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Descripción de la biomasa residual y su acondicionamiento

Se utilizan dos biomásas lignocelulósicas residuales: cáscaras de banano guineo o *Musa sapientum* de la familia musaceae y mazorca de cacao de la variedad CCN-51 (Colección Castro Naranjal 51). Las cáscaras de banano y las mazorcas de cacao provienen de la ciudad de Guayaquil y sus localidades cercanas en la provincia de Guayas –Ecuador. Los análisis químicos y eléctricos se realizaron en duplicado y triplicado respectivamente. La primera etapa de pre limpieza se realiza en la empresa Clydent S.A, de donde son traídos los residuos, siguiendo su propio protocolo. Posteriormente, se seca el material durante 72 horas a 40°C y se reduce de tamaño con un molino eléctrico (Grinder High Speed, Goldenway) en tres secuencias de 1 min de duración. El material molido se tamiza entre dos tamices (mesh 35 y 60) reteniendo la fracción de partículas entre 250 y 500 µm. A estas muestras se las denomina material “nativo”.

### 2.2. Análisis Proximal del Material Nativo

Se analizan los dos materiales nativos de modo independiente para determinar su contenido de cenizas, humedad, proteína, grasa y carbohidratos.

#### 2.2.1. Cenizas

Para este procedimiento se sigue la norma AOAC 2015,942.05. Se colocan 5 g de muestra nativa en crisoles previamente pesados, se llevan al interior de una mufla por 24 horas a 550°C. Una vez frío se pesa nuevamente para obtener el contenido de ceniza por diferencia.

### 2.2.2. Humedad

Se sigue la norma AOAC 2015,934.01 Se coloca 5 g de muestra nativa en crisoles previamente pesados y se lleva al interior de un horno por 24 horas a una temperatura de 150°C. Una vez frio se pesa nuevamente para obtener el contenido de humedad por diferencia.

### 2.2.3. Proteína

Se sigue la norma AOAC 2015, 2001.11 Se colocan 0,5 g de material nativo en secciones triangulares de papel filtro el cual se sella y se coloca en el equipo (Heating Digester DK6, Vielp Scientifica). Se adicionan 12 ml de ácido sulfúrico a cada muestra para su digestión y una pastilla catalizadora, primero se calienta a 250°C durante 30 min. Luego se incrementa la temperatura a 420°C durante 45 min. Se deja enfriar las muestras, continuación se recoge el material en una solución de ácido bórico al 4% y se destila con una solución de hidróxido de sodio al 35%. Después, el destilado, se titula con una solución de 0.2 N de ácido clorhídrico usando 4 gotas del indicador Tashiro. Se recolectan los datos de nitrógeno obtenidos y después de calcular la cantidad de nitrógeno con la ecuación 1 se multiplica por el factor universal de 6.25% de proteína como se muestra en la ecuación 2 y se obtiene el porcentaje total de proteína.

$$\%N_2 = \frac{Normalidad_{HCl} * V_{HCl} * PE_{N_2} * 100}{Masa_{muestra} [mg]} \quad (1)$$

$$\%Proteína = 6.25 \times \%N_2 \quad (2)$$

donde conocemos la normalidad del ácido clorhídrico y el volumen del mismo por la titulación.  $PE_{N_2}$  es el valor del peso equivalente de nitrógeno molecular y el peso de la muestra de la biomasa inicial.



#### 2.2.4. Grasa

Según la norma AOAC 2001.954.02 se sigue un proceso de extracción Soxhlet donde se colocan 2 g de material nativo en dedales de extracción de celulosa. Se pesan los vasos propios del equipo y se colocan 60 ml de hexano en cada uno. Se ajusta el dedal de celulosa con el material en el equipo y se da inicio al proceso de inmersión, que tarda 60 min y se realiza a una temperatura de 130°C. Luego continua el proceso de lavado del material, por 60 min y con la temperatura constante de 130°C y finalmente el proceso de lavado que se lleva a cabo por 45 min. Se recupera el hexano usado siguiendo el protocolo del equipo Soxhlet (Vielp Scientific, Ser 148 Solvent Extractor). Una vez terminado el proceso se pesa nuevamente los vasos y por diferencia el peso inicial y final se conoce la cantidad de grasa que pierde el material y se calcula el porcentaje de grasa que representa.

Siguiendo la normativa de Official Methods of Analysis de la Association of Analytical Chemists (AOAC), los carbohidratos solubles se calculan por diferencia de 100.

#### 2.3. Determinación de Carbono Orgánico Total y Nitrógeno total

El proceso de determinación de carbono orgánico total y nitrógeno total se realiza por triplicado en tres muestras por cada material. Las muestras son: material nativo, 6h a 150°C y 6h a 210°C.

##### 2.3.1. Determinación de Carbono Orgánico Total

Según el protocolo de determinación de carbono orgánico total (TOC) con sus siglas en inglés, se sigue un proceso de determinación de carbono haciendo uso del equipo analizador total de carbono organizo (TOC Analyzer SSM-500A, Shimatzu). Para lo cual se necesitan 40 mg de muestra, los cuales se depositan en botes de cerámica, que son previamente pesados y calcinados para eliminar evitar contaminación cruzada; los

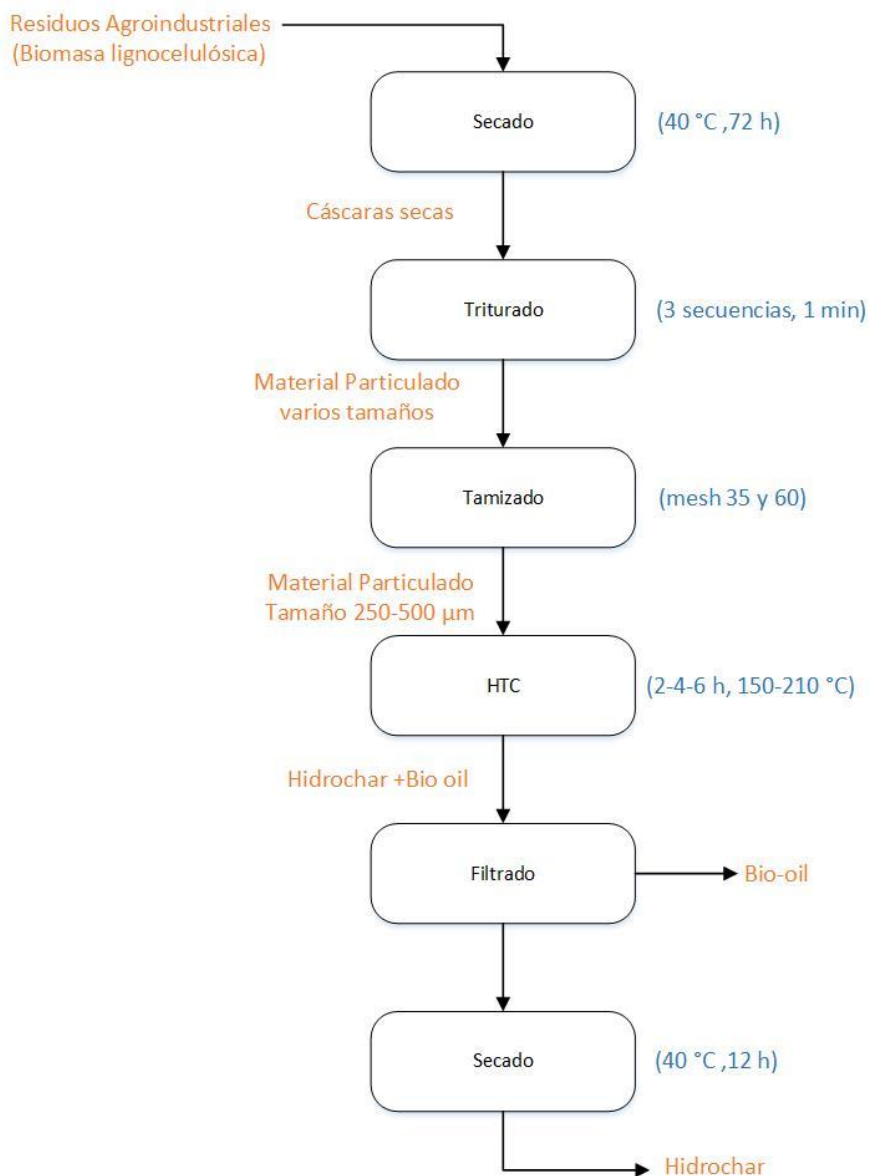
cuales se someten a combustión a 900°C durante 10 min por cada muestra. En esos 10 min se registra la cantidad de CO<sub>2</sub>, liberado en el interior del equipo y el software realiza una gráfica que indica la cantidad de carbono orgánico en la muestra. Luego se retira la muestra del equipo siguiendo las indicaciones de software propio del equipo. Se mide el área de la curva que se obtuvo del software y se obtiene el porcentaje de carbono orgánico total de la muestra.

### 2.3.2. Determinación de Nitrógeno total

Según norma AOAC 2015, 2001.11 la determinación de Nitrógeno Total se realiza siguiendo el método Kjeldahl, haciendo una digestión previamente de las muestras, se usa el equipo (Speed Digestor K436, Buchi) en donde se coloca con 12 ml de ácido sulfúrico y unas pastillas de catalizador que contienen sulfato de potasio. Luego del proceso de digestión se destila con ácido bórico en el destilador (Kjelflex K360, Buchi). El destilado se titula con ácido sulfúrico 0.01 M. Se conoce con eso el porcentaje de nitrógeno existente en la muestra.

### 2.4. Carbonización Hidrotermal (Hydrothermal Carbonization - HTC)

Se añaden 6 g de biomasa nativa en el reactor autoclave de síntesis hidrotermal PTFE para cada proceso hidrotermal. Se prepara una solución con 0,18 gramos de ácido cítrico (Lei et al., 2021) en 90 ml de agua destilada y se adicionó al interior del reactor. Se calentó el reactor en un horno (Precision, Distecnia) con dos temperaturas (150°C y 210°C) y tiempos entre (2 h y 6 h).



**Figura 1.** Diagrama de bloque de la elaboración de Hidrochar a partir de residuos agroindustriales.

Se retira el reactor del horno, se deja enfriar a temperatura ambiente, una vez frío, el material resultante de la reacción hidrotermal se filtra al vacío con el fin de separar la fase líquida denominada bio-oil. Para la filtración, previamente se pesa el papel filtro. El material filtrado junto con el papel filtro se coloca en una caja Petri para pasar a un proceso de secado en un horno a 40°C durante 12 horas o hasta que el peso del material seco se estabilice. La Figura 1 presenta el diagrama de bloques del proceso HTC seguido en este proyecto.

## 2.5. Caracterización por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

La caracterización por espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) es una técnica de análisis que utiliza una parte del espectro electromagnético, se maneja rangos de longitudes de onda específicas para conocer la composición de los materiales (Rind et al., 2022) Para el análisis se usa el espectroscopio (Cari 630 FTIR, Agilent Technologies) en donde se depositan 5 mg de biomaterial en el detector de cristal y se ajusta con el retenedor. Haciendo uso del software propio del equipo (Agilent MicroLabsoftware) se realiza la medición de cada una de las muestras. Una vez obtenida la información se exporta al programa Origin para obtener los gráficos correspondientes y poder realizar su análisis.

## 2.6. Caracterización Eléctrica

La caracterización eléctrica consiste en realizar mediciones de la característica capacitancia-voltaje a distintas frecuencias. Los materiales nativos e hidrochars fueron transformados en pellets de forma cilíndrica regular a través de un proceso de “pastillaje” (Anexo C. Elaboración de pallets). Este proceso se lleva a cabo en la prensa hidráulica (Vertical Hydraulic Pellet Press, MTI Corporation). El proceso consiste en introducir el biomaterial en un molde cilíndrico de acero inoxidable diseñado específicamente para este proyecto, el mismo que se ha sometido a calentamiento previo, a una temperatura de 100°C durante 5 min. Después se introduce en la prensa y se sube la presión de forma manual y lineal hasta llegar a 30 MPa. Las dimensiones del molde son 12 mm de diámetro y 1 cm de alto en su interior, sin embargo, el espesor del pallet varía según el material y su compresibilidad. Una vez elaboradas las “pastillas” se hace uso del “Semiconductor Device Parameter Analyzer” que es el equipo mediante el cual dichas pastillas reciben una frecuencia y se mide la capacidad de retener el voltaje. Haciendo uso del equipo antes mencionado las pastillas son sometidas a tres

frecuencias por separado (100 kHz, 500 kHz y 1 MHz) con 10 ciclos en cada una. El equipo arroja los valores de Voltaje AC, y la frecuencia es el valor conocido con lo cual el interés está en determinar la permitividad relativa de los materiales con base en la ecuación 3:

$$\epsilon_R = C \cdot \frac{\delta}{\epsilon_0 A} \quad (3)$$

donde  $\epsilon_R$  es la permitividad relativa (llamada comúnmente constante dieléctrica), C es capacitancia en F,  $\epsilon_0$  es la permitividad del vacío en F/mm, A es el área circular de la pastilla en  $\text{mm}^2$  y  $\delta$  es su altura (grosor) en mm. Valores altos de constantes dieléctricas reflejan mejor capacidad del material de absorber energía en forma de campo electromagnético (Ellison et al., 2017). Se grafican curvas de permitividad relativa versus frecuencia para su análisis.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

#### 3.1. Análisis Proximal, carbono orgánico total y nitrógeno total

**Tabla 1.** Resultados del análisis proximal de cáscaras de cacao y banano

Parámetro %[m/m]	Cáscara de Cacao	Cáscara de Banano
Grasa	2,14 ± 0,20	13,24 ± 0,06
Proteína	4,90 ± 0,50	10,85 ± 0,50
Ceniza	16,54 ± 0,15	9,86 ± 0,24
Humedad	6,15 ± 0,20	1,17 ± 0,08
Carbohidratos	70,27 ± 0,26	64,88 ± 0,22

En la Tabla 1 se muestran los valores resultantes del análisis proximal obtenidos para los residuos de cáscaras de cacao y banano. Respecto a los porcentajes de grasa, la

cáscara de banano tiene una cantidad mayor en relación al residuo de cacao con un 13,24%. Para la proteína de igual forma la cáscara del banano tiene un mayor porcentaje en un 10,85%. En el caso de la ceniza y humedad, por el contrario, el residuo con mayores porcentajes es el cacao con un 16,54 % de ceniza y un 6,15 % de humedad. En la cantidad de carbohidratos el cacao supera el 70% mientras que el cacao está alrededor del 65%.

Para la cáscara de cacao, según estudios previos realizados por (Cardona et al., 2002) el porcentaje de humedad registrado es de 6%, siendo muy similar al obtenido en este trabajo. Por otro lado, en la cantidad de proteína es de 6,3% según los estudios realizados por (Villamizar-Jaimes & López-Giraldo, 2017) lo que resulta mayor a la que se obtuvo en este trabajo, quien menciona también una cantidad de 11,4% de cenizas que resulta menor en 5 % con las realizadas en este estudio. Finalmente se considera que la cantidad de carbohidratos obtenida es similar a la que mencionan (Sangronis et al., 2014) con un rango entre 70% y 72% similar al reportado y un valor de grasas de 1,38 similar al obtenido en esta investigación.

En una investigación realizada por López y otros la caracterización proximal de la cantidad de grasa es 13,1 % (López et al., 2014) muy similar a la obtenida. De igual forma en los análisis realizados por (Kabenge et al., 2018) se obtiene que el porcentaje de ceniza es de 9,28 % nuevamente similar al reportado. Por lo que se confirman los valores obtenidos en los análisis con la literatura.

**Tabla 2.** Resultados del análisis de carbono orgánico total y nitrógeno en cáscara de banano nativo hidrochar 6h.

	Temperatura °C	TOC (%C)	%N
<b>Material Nativo Banano</b>	×	44,06 ± 0,43	1,62 ± 0,00
<b>Hidrochar Banano</b>	150	50,87 ± 0,50	2,04 ± 0,05
	210	64,06 ± 0,28	1,77 ± 0,03

**Tabla 3.** Resultados del análisis de carbono orgánico total y nitrógeno en cáscara de cacao nativo e hidrochar 6h.

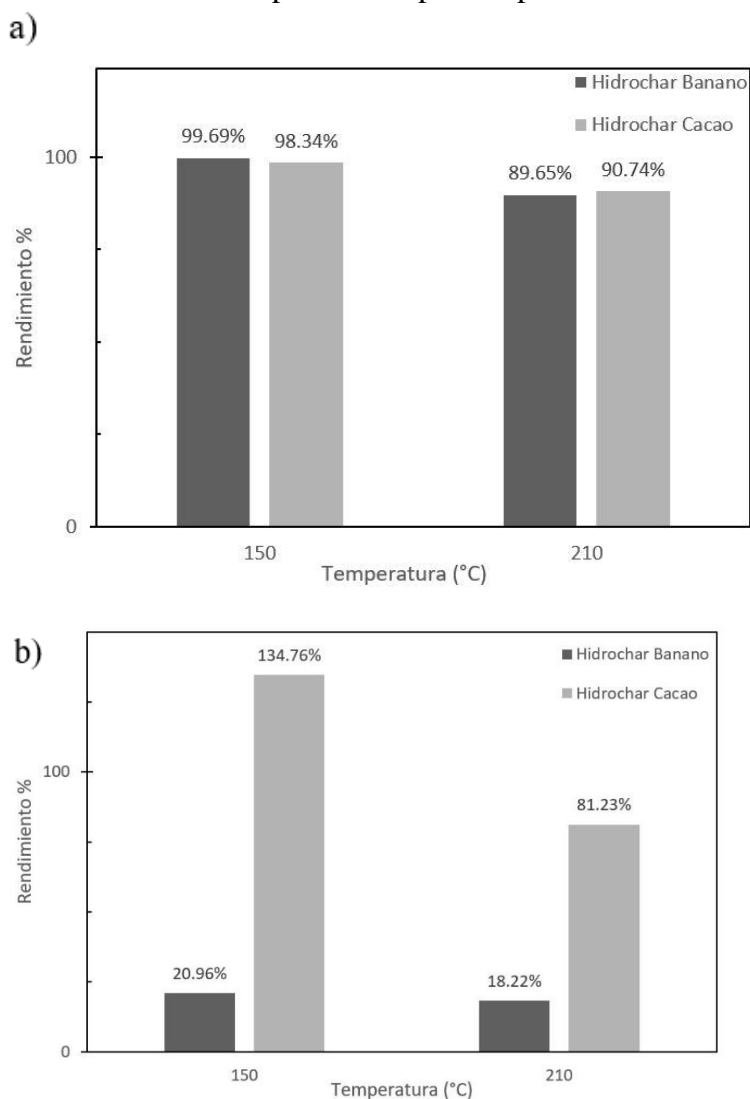
	Temperatura °C	TOC (%C)	%N
<b>Material Nativo Cacao</b>	×	44,08 ± 0,78	0,79 ± 0,01
<b>Hidrochar Cacao</b>	150	50,06 ± 0,43	1,23 ± 0,03
	210	63,55 ± 0,65	1,02 ± 0,02

En las Tablas 2 y 3, se observan los datos obtenidos del análisis de porcentaje de carbono orgánico total y porcentaje de nitrógeno en los materiales nativos y de tipo hidrochar correspondiente a 6 h en las dos temperaturas. Comparando los datos de materia sin un tratamiento hidrotermal previo (cacao nativo, banano nativo) se observa un aumento en el porcentaje de carbono al compararlo con las muestras que corresponden a carbón hidrotermal, tanto en el banano como en el cacao incrementa alrededor del 10% a la temperatura de 150°C y 20% con los hidrochar de 210°C. Al aumentar la temperatura de 150°C a 210°C, el porcentaje de carbono incrementa a 64 % en el banano y a 63% en el cacao. El porcentaje de nitrógeno el material de banano sin HTC se obtuvo un valor de 1,62% y después de hacer uso del tratamiento hidrotermal se observa un aumento entre el 1,23% y 2,02%. En el caso del cacao de igual forma se observa un aumento de 0,79% a 1,23% y 1,02% respectivamente.

Como se puede observar en los resultados, el valor del contenido de carbono orgánico aumenta en función a su transformación a hidrochar, esto debido a que a mayor temperatura la cantidad de carbono orgánico total que contiene el material, en un inicio (material nativo) aumenta. Estos resultados se confirman con los obtenidos en la

literatura (Singh, 2021). El contenido de carbono medido es mayor cuando el material ya ha sido carbonizado por medio del HTC. Resultados demuestran que la cáscara de banano en forma nativa tiene más porcentaje de grasa y proteína en relación al cacao. Mientras que la cáscara de cacao tiene mayor cantidad de humedad, genera gran cantidad de ceniza y posee más carbohidratos (Liu et al., 2018).

Para una mejor apreciación del rendimiento de carbón en el hidrochar de cacao y banano en diferentes temperaturas, se realizaron graficas de barra que relacionan el porcentaje de rendimiento en función de las dos temperaturas. En las cuales se aprecia los valores alcanzados para cada material comparándolas por temperatura de reacción.

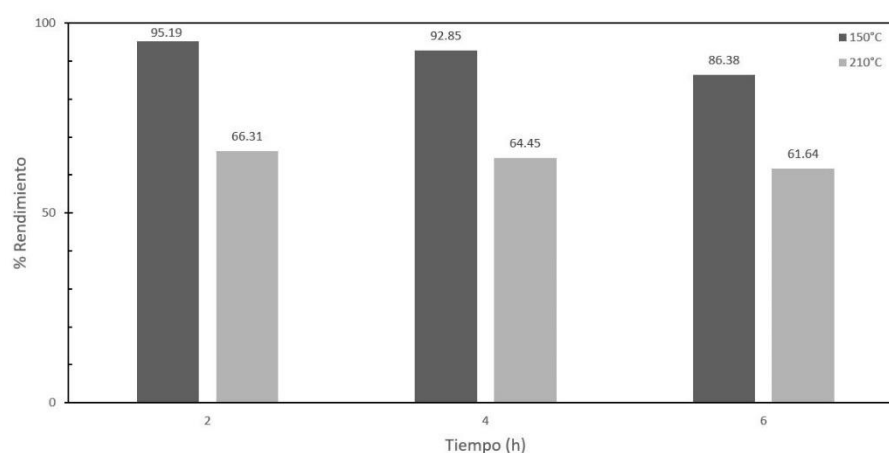


**Figura 2.** Graficas de rendimiento de a) carbón orgánico total y b) nitrógeno total de hidrochars de cáscaras de banano y cacao 6h.



La información recopilada y mencionada hasta el momento resulta ser muy útil para entender la transformación de los dos materiales después de haber realizado el tratamiento hidrotermal. En cuanto al contenido de carbono orgánico total y nitrógeno total se encuentran en un rango de 60 a 65 % de TOC después del tratamiento hidrotermal y aproximadamente de 1% para el contenido de nitrógeno. Esto se correlaciona con los valores de constantes dieléctricas obtenidos, pues a menor contenido de carbono se espera menores valores de permitividad relativa. En el mismo sentido la constante dieléctrica de un material tiene relación directa con la cantidad de carbono en el material y podemos ver que en este sentido la cantidad de carbono disminuye y por ende también desciende su constante dieléctrica (Constante & Machado, 2020).

### 3.2. Carbonización Hidrotermal

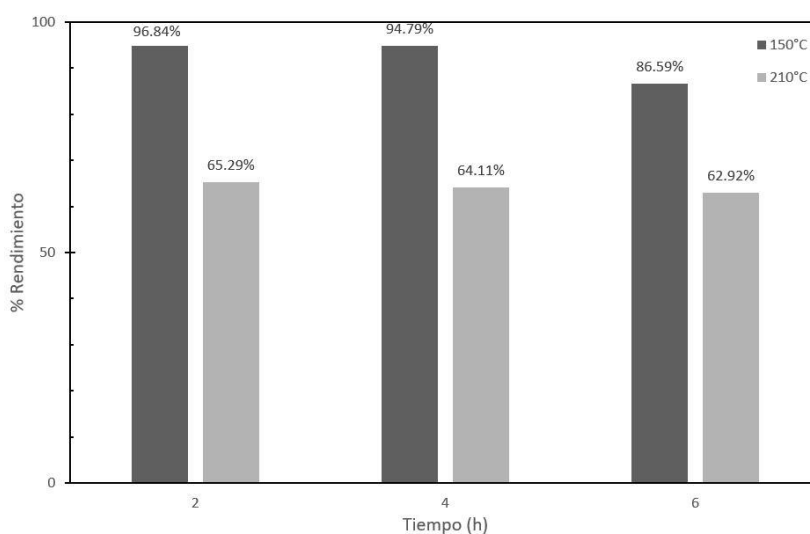


**Figura 3.** Diagrama de barras comparación de porcentaje de peso obtenido de la cáscara de banano después del proceso hidrotermal a diferentes horas

La Figura 3 permite identificar los porcentajes del proceso hidrotermal de la cascara de banano a dos diferentes temperaturas con un rango de tiempo de 2, 4 y 6 horas. El rendimiento se determinó en base al peso de la biomasa después del proceso en el reactor se observa una disminución pérdida de biomasa a medida que se aumenta la temperatura

a 210°C. También al incrementar el tiempo se identifica una ligera variación en relación a disminución de porcentaje.

Esta pérdida de peso de la cascara de banano que se representa en la Figura 3 podemos determinar que dentro del proceso hidrotérmal la biomasa al ser sometida a altas temperaturas y una mayor cantidad de tiempo la biomasa pierde componentes que se degradan o transforman.



**Figura 4.** Diagrama de barras comparación de porcentaje de peso obtenido de la cáscara de cacao después del proceso hidrotérmal a diferentes temperaturas

En la Figura 4 se visualiza la variación del peso de la cáscara de cacao inicial y después del proceso hidrotérmal expresado en porcentajes. El porcentaje de biomasa disminuye significativamente al aumentar la temperatura de 150°C a 210°C otro factor que influye en el proceso es la cantidad de horas que se realizó el proceso a mayor tiempo menor porcentaje de peso.

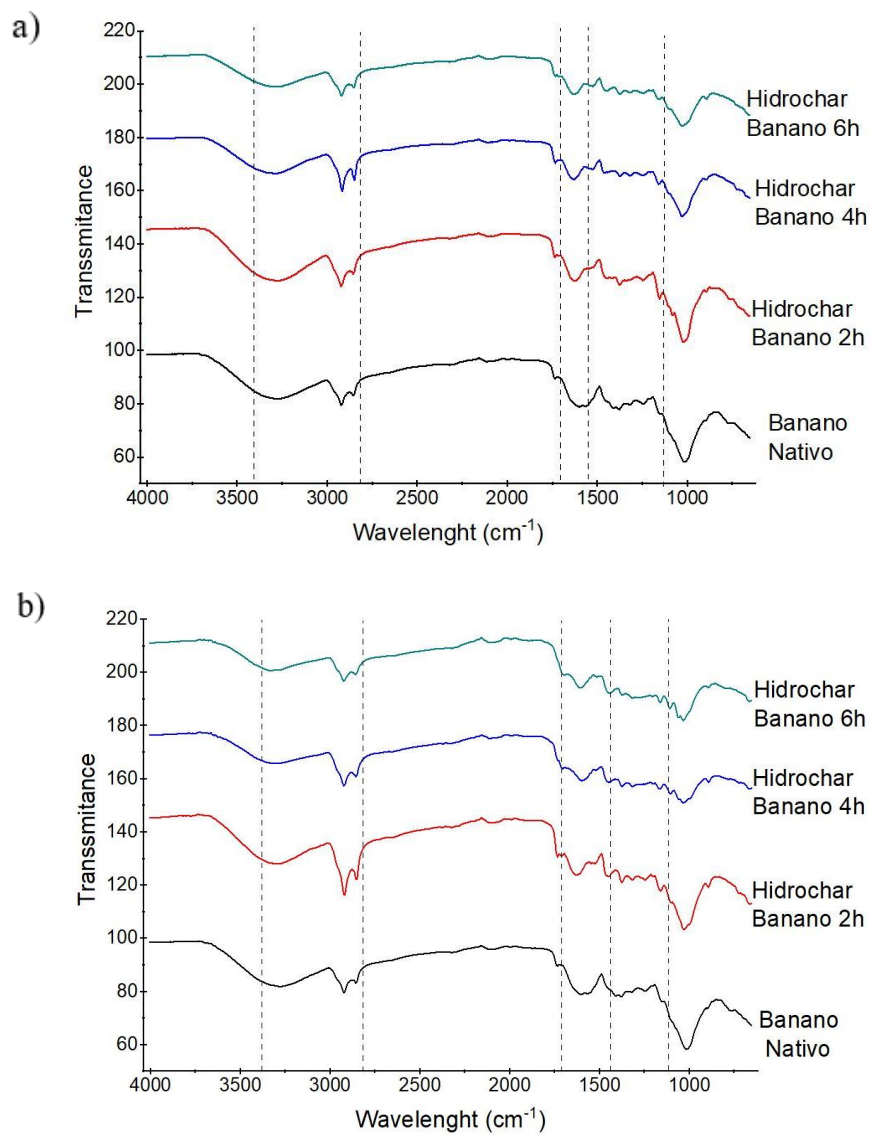
Comparado los diagramas de barras tanto de la biomasa de la mazorca de cacao y cáscara de banano podemos observar un patrón similar esto se debe a que la biomasa puede contener compuestos que poseen nitrógeno que migra en el proceso hidrotérmal una alta temperatura, si la biomasa posee un alto contenido de proteínas se promueve la

deshidratación, descarboxilación y desaminación que promueven la producción de sólidos de hidrocarbón. Si la biomasa tiene un mayor contenido de carbohidratos como: celulosa, hemicelulosa y lignina como es el caso de estas materias primas a un rango de temperatura entre los 180°C a 240°C favorece a un proceso de hidrolisis que hace que las moléculas cambien y se fomente un enriquecimiento del nitrógeno en el hidrochar (Leng et al., 2021)

### 3.3. Caracterización por Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

#### 3.3.1. FTIR – Banano

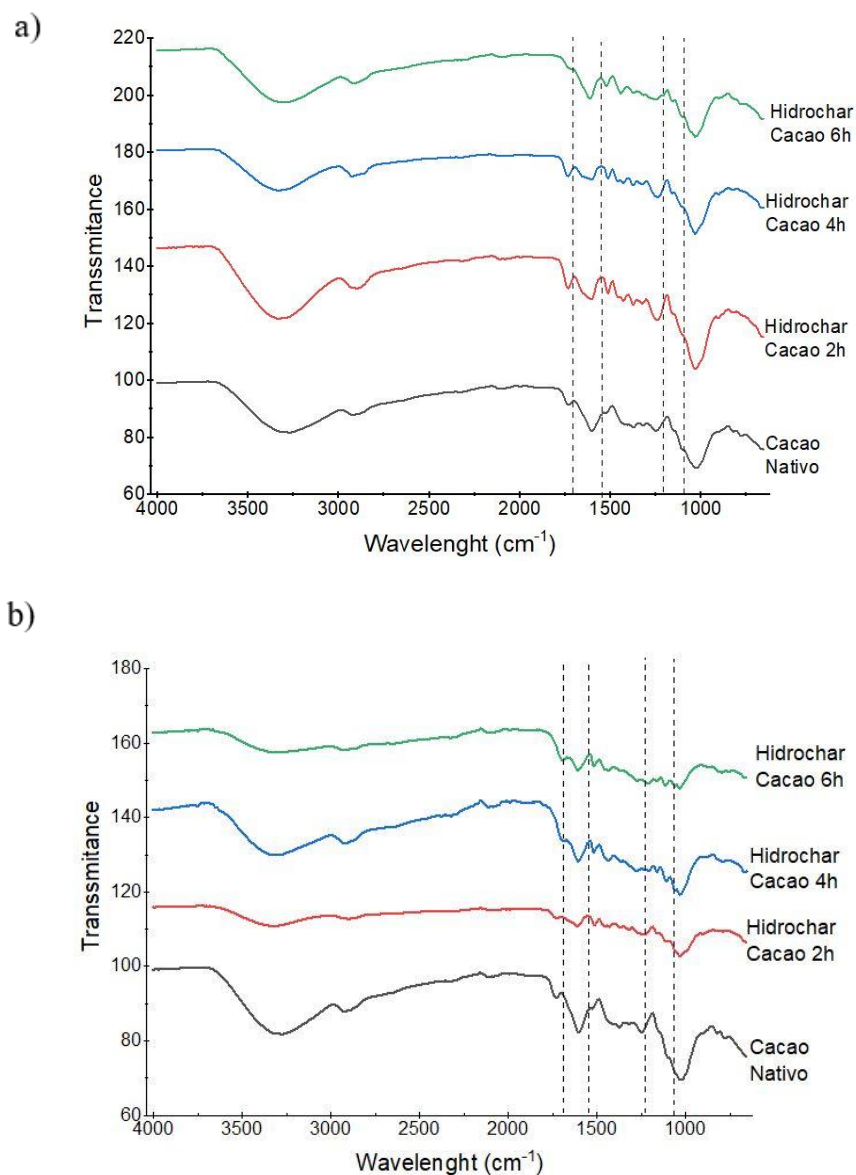
A continuación, se observan las gráficas obtenidas de la caracterización por FTIR para las muestras de 150°C y 210° con cascara de banano como material nativo. En la Figura ese pueden apreciar los cambios estructurales de los materiales sometidos a las temperaturas y los tiempos usados para este trabajo. De esta forma se puede visualizar cual es la variable que resulta más efectiva al momento de realizar el proceso de carbonización hidrotermal. Los ejes de los gráficos de FTIR son transmitancia en función de longitud de onda.



**Figura 5.** Espectros FTIR de cáscara de banano nativo e hidrochars a (a)150°C y (b) 210°C a diferentes tiempos de tratamiento HTC.

### 3.3.2. FTIR - Cacao

De igual manera en el caso del cacao se realizó la caracterización FTIR para monitorear el estado de y como se ha modificado la estructura de las cáscaras en la carbonización por HTC, a las temperaturas de 150°C y 210°C durante los tiempos de 2 h, 4 h y 6 h.



**Figura 6.** Espectros FTIR de cáscara de cacao nativo e hidrochars a (a)150°C y (b) 210°C a diferentes tiempos de tratamiento HTC.

En la Figura 5a En la Figura 5b se indican los espectros FTIR correspondientes a las muestras nativa e hidrochar de banano a 150°C de 2, 4 y 6 horas, y se observa que las cuatro diferentes curvas obtenidas no varían en su composición. Para corroborar esto se analiza los siguientes picos, en el pico correspondiente a 3400  $\text{cm}^{-1}$  se encuentran los grupos hidroxilos. En los picos correspondientes al rango 2800 a 3000  $\text{cm}^{-1}$  corresponden vibraciones de C-H. El pico en 1700  $\text{cm}^{-1}$  que corresponden a grupos carbonilos (C=O) (Castro, 2015). En el rango 1580 a 1600  $\text{cm}^{-1}$  se observa el doblamiento de las vibraciones de N-H y finalmente en el rango de 1100 a 1300  $\text{cm}^{-1}$  se visualizan picos del doblamiento de (C-H) de la celulosa, hemicelulosa y ligninas (Dahiru, Zango, & Haruna, 2018). En la gráfica se analiza que todas las estructuras mencionadas se mantienen, lo cual indica que no hay cambio estructural al realizar la carbonización hidrotermal del banano a 150°C, a pesar de permanecer a esta temperatura por 6 horas.

Sin embargo, se puede destacar que en el rango que rodea a los 1600  $\text{cm}^{-1}$  existen ligeros cambios que generan un pico más pronunciado que en la muestra nativa y que se relación con los compuestos nitrogenados.

A mayor temperatura, 210°C (Figura 5b) basándonos en los mismos puntos de comparación se observa que existen cambios en los picos entre 1100 a 1300  $\text{cm}^{-1}$  y 1580 a 1600  $\text{cm}^{-1}$ . Lo que significaría una alteración en la cantidad de celulosa, hemicelulosa y de ligninas que se encontraban en el inicio, junto con actividad de los compuestos nitrogenados. Esta alteración en su estructura es más visible a medida que aumenta el tiempo de calentamiento, debido a que en la curva de 4h los picos se ven reducidos en comparación a la nativa lo que significaría que la estructura empieza a descomponerse. Este cambio también está presente en la curva de 6 h y es mucho más evidente pues

existen picos pequeños, sin embargo, se ve una descomposición en el rango de los 1600 pero que no es un crecimiento del pico como en la temperatura menor.

En la Figura 6a correspondiente a cacao en su forma nativa y de hidrochar a 150°C, se puede observar la misma estructura química y al analizar sus picos, es posible confirmar que el material no ha sufrido mayores cambios. En el pico ubicado 1730  $\text{cm}^{-1}$  correspondiente a las vibraciones de hemicelulosa con el estiramiento de (C-O). De igual forma en el pico dispuesto en 1520  $\text{cm}^{-1}$  que es el que muestra las vibraciones de las ligninas, junto con el pico situado alrededor de la longitud de onda de 1200  $\text{cm}^{-1}$  que muestra el estiramiento asimétrico de la celulosa y finalmente en el pico localizado cerca de 1107  $\text{cm}^{-1}$  pertenecen al estiramiento de asimétrico (C-O-C) (Alvarez-Barreto et al., 2021).

De manera similar, a 210°C (Figura 6b), es evidente que, si existen cambios en las estructuras del cacao de igual forma al comparar las muestras de 4 y 6h con las muestras nativas, se puede ver que los picos en general disminuyen de tamaño. Tomando en consideración los picos antes mencionados se puede decir que se observa que entre los 1100 hasta 2000  $\text{cm}^{-1}$  han tenido cambios en sus estructuras y se han degradado. Los valores en los que hacemos la comparación corresponden a las ligninas y la celulosa. Lo cual implica que el proceso de carbonización a esta temperatura tiene mejores resultados a la temperatura de 210°C.

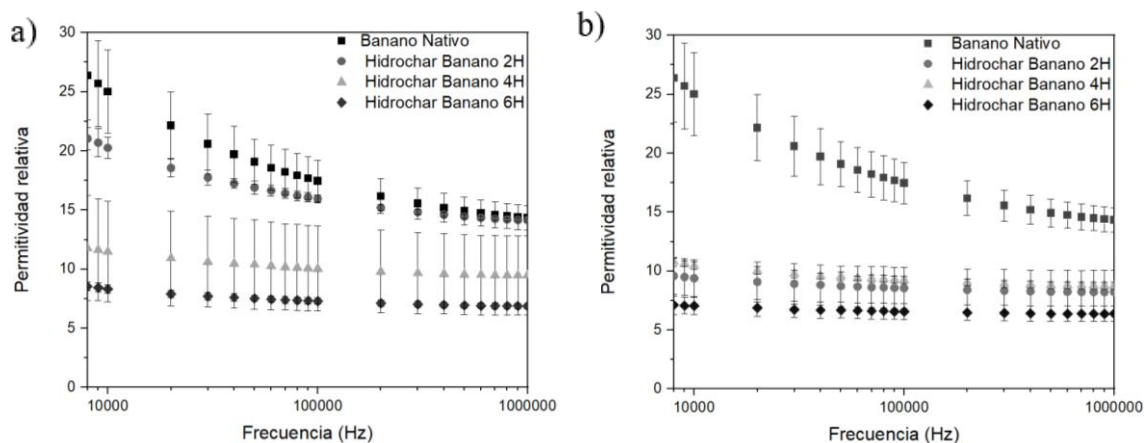
#### 3.4. Determinación de la permitividad relativa (constante dieléctrica)

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas a partir de la determinación de la permitividad relativa del material, también conocido como constante dieléctrica de los materiales, esta propiedad nos permitirá conocer las características eléctricas del mismo y de esta forma evaluar que tan eficaz es para almacenar carga eléctrica. En este sentido

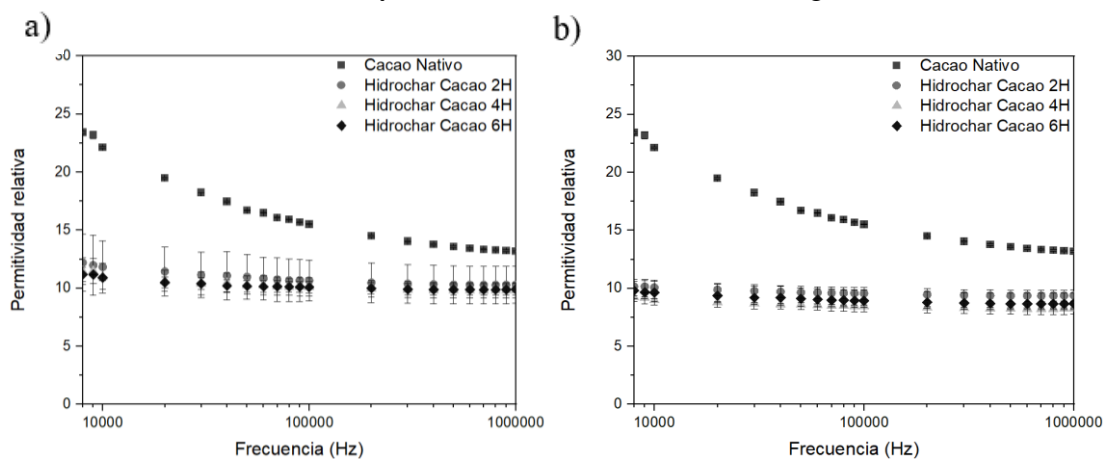
se realizan esta comparación entre los dos materiales y en las temperaturas evaluadas en este proyecto en dos gráficos por separado. Los gráficos están en función de la permitividad relativa medida versus un barrido de frecuencias hasta los 1GHz. En este caso se debe visualizar el nivel en el que se estabiliza el material y el de menor permitividad relativa es el que tiene las características que se busca. pero se debe mantener constante a lo largo de la frecuencia.

Las cáscaras de banano, en forma nativa presenta un valor final de 14.45 de permitividad relativa. En el caso de los valores de la constante dieléctrica de los hidrochar a los 150°C el valor obtenido en el material nativo es muy cercano al del hidrochar de 2h con 14,19, el de 4h es de alrededor 10,83 y en el caso del hidrochar de 6h de tratamiento varia cerca de 6,89. Se entiende que a pesar de no tener cambios en la estructura del material si disminuye su capacidad de almacenamiento de carga electrostática. Una vez concluido el tratamiento de carbonización hidrotermal a una temperatura de 210°C se puede observar que continua con esta tendencia de disminuir la permitividad relativa a medida que se queme un poco más, el valor promedio de capacitor para este material es de 6,38 en 210°C con 6 h de tratamiento, de 8,77 para el hidrochar de 4h y de 6,17 para el de 2h. Eso significa que el hasta dentro del banano el hidrochar que posee mejor capacidad de almacenar campo eléctrico es el de 4h.





**Figura 7.** Permitividad relativa de biomasa nativa e hidrochars de cáscara de banano sometidos a HTC a a) 150°C y b) 210°C versus frecuencia (rango de 10 MHz a 1 GHz)



**Figura 8.** Permitividad relativa de biomasa nativa e hidrochars de cáscara de cacao sometidos a HTC a a) 150°C y b) 210°C versus frecuencia (rango de 10 MHz a 1GHz)

En cuanto a las cáscaras de cacao, los valores de permitividad relativa alcanzados a 150°C están alrededor de 9,88 en con 6h de calentamiento, 9,81 con 4h de HTC y 10,28 para el hidrochar de 2h. Para los hidrochars con 210°C se tiene que sus permitividades relativas se encuentran alrededor 10,19 en hidrochar 2 h, 8,24 para los hidrochar de 4h y de 8,66 para hidrochar de 6 h. Con los valores obtenidos se puede determinar que, entre los hidrochars de cáscara de cacao, el que mejores características capacitivas tiene es el hidrochar de 2 h a 210°C.

A partir de los resultados anteriores (Figura 7 y Figura 8), la temperatura inicial de 150°C no es la más indicada para obtener material carbonizado en general, sin embargo,

en las dos temperaturas se ve una tendencia a disminuir la capacidad de almacenar carga electrostática del material respecto al nativo. Esto se verifica, además, con los resultados de permitividad relativa de 210°C puesto que en el material más carbonizado los valores de permitividad relativa de los hidrochar son aún más bajos en relación a los de 150°C y se puede explicar debido a que existe mayor cantidad de carbón presente respecto al material después del HTC. La tendencia de obtención de valores de permitividad relativa menores a mayor tiempo de tratamiento es evidente y estadísticamente diferente entre horas a la temperatura de 210°C Los valores de constante dieléctrica antes mencionados dejan como resultado entonces, el cacao un mejor dieléctrico y por tanto un material más capaz de almacenar energía en forma de campo electromagnético. Esto implica que, por ejemplo, se pueda emplear estos hidrochars en dispositivos como condensadores eléctricos (capacitores), soportes mecánicos, materiales aislantes, entre otros. Es importante señalar, que cualquier material dieléctrico puede volverse un material conductor siempre que se sobrepase el campo de ruptura del material dieléctrico, es decir, se aumente demasiado el campo eléctrico (Hou et al., 2021).

**Tabla 4.** Resultados de los valores de permitividad relativa de hidrochars en 150° C y 210° C

	150°C		210°C	
	Cáscara de Cacao	Cáscara de Banano	Cáscara de Cacao	Cáscara de Banano
<b>Material Nativo</b>	13.26	14.45	13.26	14.45
<b>Hidrochar 2h</b>	10.28	8.23	10.19	8.23
<b>Hidrochar 4h</b>	9.81	8.77	8.24	8.77
<b>Hidrochar 6h</b>	9.89	6.38	8.66	6.38

En la Tabla 4 se observan los resultados resumidos de los valores finales a los que llegan los pellets de hidrochar elaborados durante este estudio. Se ratifica lo observado en la figura 8b, pues el mejor material dieléctrico después del tratamiento de carbonización hidrotermal resulta ser el cacao con la temperatura de 210°C, y 2h, al cual le corresponde

una permitividad relativa de 10,19. Como se puede observar los que tienen mayor permitividad son los materiales nativos, sin embargo, este material no se recomienda para un uso en la industria eléctrica.

Al realizar un análisis sobre los resultados se puede observar que los materiales nativos presentan una permitividad relativa mayor a la de sus hidrochar en el caso de la cascara de banana y de cacao, lo cual se confirma con la literatura. Según la investigación realizada por (Guo et al., 2015). Se puede comprobar que el hidrochar como material eléctrico disminuye su capacidad para almacenar energía.

La porosidad del hidrochar permite que este adquiera características como resistencia térmica y se mantengan características de material original. Para obtener un materiales que puedan ser aplicados como superconductores es necesario la utilización de estructuras jerárquicas porosas que mejoren el rendimiento electroquímico mediante el proceso de hidrolisis hidrotermal realizado se pueden modificar la estructura de la biomasa y obtener una superficie porosa que mejoren el rendimiento electroquímico para adquirir una mejor capacitancia, estabilidad sin embargo una de las principales dificultades es lograr un eficiencia en el proceso que permita un alto rendimiento en el grado de carbonización y grafitización que mejoren las características porosos a la vez su funcionalidad superficial incluyendo un aumento en los valores de permitividad relativa. Por ese motivo es necesario realizar análisis SEM (Microscopía electrónica de barrido) para determinar el tamaño de los poros y su distribución del hidrochar de la cáscara de cacao y banano datos que se pueden correlacionar con valores obtenidos en la Tabla 4 (Sharma et al., 2021)

### 3.5. Relación entre el contenido de carbono y constante dieléctrica

Como se puede observar en la determinación de los resultados de los análisis eléctricos, la constante dieléctrica, tiene una relación inversa respecto al contenido de carbono en

el material. Esto se puede entender debido a que a medida que incrementamos la temperatura y tiempo en el proceso de carbonización hidrotermal existe más carbón que material orgánico. En las Figuras 7 y 8, los dos materiales continúan bajando su permitividad relativa a medida que aumentamos temperatura y tiempo, se espera que continúe disminuyendo hasta aproximarse a un valor límite.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluaron varias propiedades químicas y eléctricas de material carbonizado proveniente de residuos agroindustriales sometidos a tratamientos hidrotermales (HTC). Los materiales seleccionados fueron residuos agroindustriales como: cáscara de banano guineo y cáscara de mazorca de cacao de tipo CCN-51 para proponer una alternativa que permita aprovechar esta biomasa por sus propiedades físicas y químicas como posibles materiales superconductores fomentando un sistema economía circular. Los tratamientos HTC fueron realizados a 150°C y 210°C con cantidades fijas de biomasa, ácido cítrico como catalizador y agua, como medio de reacción. Después de la realización de este trabajo de investigación se conoce que la temperatura tiene más efecto que el tiempo al momento de la elaboración de hidrochars. Por lo cual es posible decir que la temperatura de 210°C es óptima para la obtención de hidrochar. También se determinó que la temperatura de 150°C resulta se obtuvo un mayor porcentaje de contenido de nitrógeno que se puede atribuir compuestos nitrogenados. Sobre los análisis eléctricos se concluye que el hidrochar de cáscara de mazorca de cacao es un mejor material dieléctrico y por tanto un material más capaz de almacenar energía en forma de campo eléctrico. Pruebas de sensibilidad en cuanto a la utilización de ácido cítrico a otras concentraciones y ensayos a mayor temperatura están en curso con el fin de optimizar el proceso HTC.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, D. (2019). *Determinación del potencial energético de la biomasa residual de cultivos de nanao en el cantón Machala, el Oro, Ecuador.*
- Alvarez-Barreto, J. F., Larrea, F., Pinos, M. C., Benalcázar, J., Oña, D., Andino, C., Viteri, D. A., Leon, M., & Almeida-Streitwieser, D. (2021). Chemical pretreatments on residual cocoa pod shell biomass for bioethanol production. *Bionatura*, 6(1), 1490–1500. <https://doi.org/10.21931/RB/2020.06.01.9>
- Astudillo, A. (2015). *Análisis de factibilidad para la elaboración de productos alimenticios a partir del rechazo de banano en la provincia de Guayas.*
- Bhavani, P., Hussain, M., & Park, Y. K. (2022). Recent advancements on the sustainable biochar based semiconducting materials for photocatalytic applications: A state of the art review. *Journal of Cleaner Production*, 330(August 2021), 129899. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129899>
- Campos-Vega, R., Nieto-Figueroa, K. H., & Oomah, B. D. (2018). Cocoa (*Theobroma cacao* L.) pod husk: Renewable source of bioactive compounds. *Trends in Food Science & Technology*, 81, 172–184. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2018.09.022>
- Castro, B. (2015). *Uso de la cáscara de banano (musa paradisiaca) maduro deshidratada (seca) como proceso de bioadsorción para la retención de metales pesados, plomo y cromo en aguas contaminadas.*
- Cervera, M. (2020). *Evaluación del uso del residuo de desmote de algodón como materia prima para la producción de biochar en Argentina.* <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/108144/TFM-1795-CERVERA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Constante, Y., & Machado, A. (2020). *Estudio de biochar obtenido a partir de cáscara de cacao, como mejorador del suelo en un cultivo de frejol (Phaseolus vulgaris).* Universidad San Francisco de Quito .
- Domínguez, J. (2018). *Obtención de Materiales carbonosos y furanos a partir de Bagazo de agave por carbonización hidrotérmica.* [https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2250/1/Tesis Judith Dominguez Materiales carbonosos y furanos.pdf](https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2250/1/Tesis%20Judith%20Dominguez%20Materiales%20carbonosos%20y%20furanos.pdf)
- Echeverría, W. (2021). *Determinación del contenido de lignina presente en biomásas residuales procedentes del sector agrícola ecuatoriano.* [http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/23939/1/UCE-FIQ-ECHEVERRIA WENDY.pdf](http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/23939/1/UCE-FIQ-ECHEVERRIA%20WENDY.pdf)
- Ellison, C., McKeown, M. S., Trabelsi, S., & Boldor, D. (2017). Dielectric properties of biomass/biochar mixtures at microwave frequencies. *Energies*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/en10040502>
- Erazo, C., & Pazmiño, D. (2021). *Estudio comparativo del hidrochar obtenido de la Carbonización Hidrotermal del jugo de naranja en un ambiente con y sin oxígeno.*

<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/24482/1/UCE-FIQ-ERAZO CARLOS-PAZMIÑO DOMENICA.pdf>

García, J., & Pérez, Y. (2019). *Eficiencia de diversas dosis de biochar elaborado con cáscara de naranja para la adsorción de plomo en suelos contaminados de la ribera del Río Rímac*.

[https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/51205/Garcia\\_BJM-Perez-BYL-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/51205/Garcia_BJM-Perez-BYL-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Guo, Q., Xue, Q., Sun, J., Dong, M., Xia, F., & Zhang, Z. (2015). Gigantic enhancement in the dielectric properties of polymer-based composites using core/shell MWCNT/amorphous carbon nanohybrids. *Nanoscale*, 7(8), 3660–3667.

<https://doi.org/10.1039/C4NR05264A>

Hou, J., Linxua, n F., Gang, H., Menglu, D., Fengping, L., Caiyun, W., Li, M., Heng, Z., Sun, J., & Fang, Q. (2021). Low-dielectric polymers derived from biomass. *ACS Publications*, 6. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsapm.1c00043>

Kabenge, I., Omulo, G., Banadda, N., Seay, J., Zziwa, A., & Kiggundu, N. (2018). Characterization of Banana Peels Wastes as Potential Slow Pyrolysis Feedstock. *Journal of Sustainable Development*, 11(2). <https://doi.org/10.5539/jsd.v11n2p14>

Laverde, J., Pino, N., Escobar, A., Peñuela, M., Gallego, J., Titirici, M., & López, D. (2019). *Vista de Productos de alto valor agregado a partir de la tusa de palma de aceite*. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/13092/12906>

Lei, Q., Kannan, S., & Raghavan, V. (2021). Uncatalyzed and acid-aided microwave hydrothermal carbonization of orange peel waste. *Waste Management*, 126, 106–118. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2021.02.058>

Leng, L., Yang, L., Leng, S., Zhang, W., Zhou, Y., Peng, H., Li, H., Hu, Y., Jiang, S., & Li, H. (2021). A review on nitrogen transformation in hydrochar during hydrothermal carbonization of biomass containing nitrogen. *Science of The Total Environment*, 756, 143679. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.143679>

Lin, Y. C., & Choong, Y. M. (2021). The Influence on Phenolic, Aroma Compounds, Rheological and Sensory Properties of Chocolates by Different Strains Inoculated Fermentation. *Journal of Food and Nutrition Research*, 9(3), 124–135. <https://doi.org/10.12691/jfnr-9-3-4>

Liu, Y., Ma, S., & Chen, J. (2018). A novel pyro-hydrochar via sequential carbonization of biomass waste: Preparation, characterization and adsorption capacity. *Journal of Cleaner Production*, 176, 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.090>

López, J., Cuarán, J., Arenas, L., & Flórez, L. (2014). Usos potenciales de la cáscara de banano: elaboración de un bioplástico. *Revista colombiana de investigaciones agroindustriales*, 1, 7. <https://doi.org/10.23850/24220582.109>

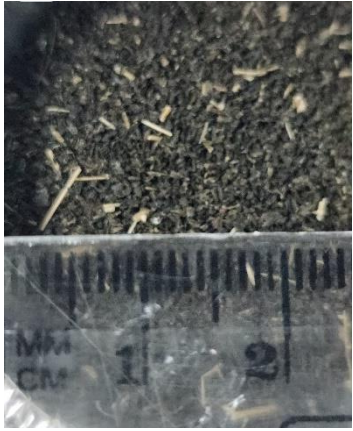


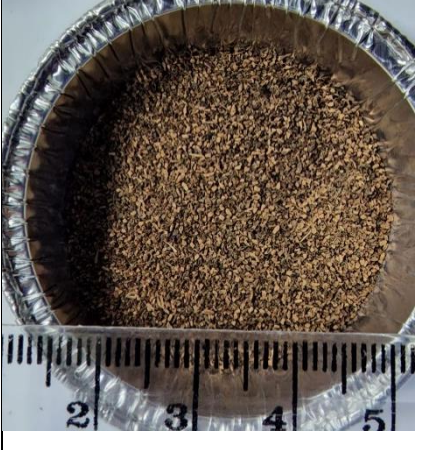
Moreira, K. (2013). *Reutilización de residuos de la cáscara de bananos (musa paradisiaca) y plátanos (musa sapientum) para la producción de alimentos destinados al consumo humano*.

- Muñoz, C., Vallejo, N., Alvarado, A., & Mendez, J. (s/f). *Caracterización fisicoquímica de hidrochar, producido a partir de la fracción sólida de residuos de frutas y verduras y residuos cítricos*. Recuperado el 28 de julio de 2022, de <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/45/49>
- Omran, B. A., & Baek, K. H. (2022). Valorization of agro-industrial biowaste to green nanomaterials for wastewater treatment: Approaching green chemistry and circular economy principles. *Journal of Environmental Management*, 311(November 2021), 114806. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114806>
- Orejuela-Escobar, L. M., Landázuri, A. C., & Goodell, B. (2021). Second generation biorefining in Ecuador: Circular bioeconomy, zero waste technology, environment and sustainable development: The nexus. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 6(2), 83–107. <https://doi.org/10.1016/J.JOBAB.2021.01.004>
- Pacheco, R., & Vilela, F. (2017). Obtenção e caracterização do hidrochar de eucalipto via carbonização hidrotermal. 7° Congresso Brasileiro de Carbono Campos do Jordao. <https://www.researchgate.net/publication/334328257>
- Rind, I. K., Memon, N., Khuhawar, M. Y., & Lanjwani, M. F. (2022). Thermally activated mango peels hydrochar for fixed-bed continuous flow decontamination of Pb(II) ions from aqueous solution. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(4), 2835–2850. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03272-8>
- Sharma, H. B., Venna, S., & Dubey, B. K. (2021). Resource recovery and circular economy approach in organic waste management using hydrothermal carbonization. *Clean Energy and Resources Recovery: Biomass Waste Based Biorefineries, Volume 1*, 313–326. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85223-4.00003-8>
- Singh, R. (2021). Future research perspectives of biochar and electrical characteristics of charcoal. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 11, 0–14.



## Anexo A: Material Nativo e Hidrochar

	Cáscara de banano	Cascara mazorca de cacao
Material Nativo Entero		
Material Nativo Tamaño 250 $\mu\text{m}$ -500 $\mu\text{m}$		
Hidrochar 2 h 150°C		

<p>Hidrochar 4 h 150°C</p>		
<p>Hidrochar 6 h 150°C</p>		

## Anexo B: Equipos



Figura 1 B. Reactor autoclave de síntesis hidrotermal PTFE 200 ml



Figura 2 B. Cari 630 FTIR, Agilent Technologies



Figura 3 B. Semiconductor Device Parameter Analyzer

## Anexo C: Elaboración de Pallets



Figura 1 C. Instrumento de elaboración de pastillas



Figura 2 C. Plancha de calentamiento en uso para pastillaje



Figura 3 C. Prensa hidráulica Vertical Hydraulic Pellet Press, MTI Corporation

Pastilla Banano



Pastilla Cacao



Figura 4 A. Resultado de la elaboración de pastillas