

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ambiente y Desarrollo
Ingeniería en Ambiente y Desarrollo



Proyecto Especial de Graduación
Propuesta de valorización de residuos de pinzote del cultivo de banano
(*Musa paradisiaca L.*) para la empresa Standard Fruit de Honduras S.A.,
la Ceiba, Honduras

Estudiante

Krissia Nohemi Guerrero Flores

Asesores

Victoria Alejandra Cortés Matamoros, Dra.

Josué Aníbal León Carvajal, Mtr.

Honduras, agosto 2024

Autoridades

SERGIO ANDRÉS RODRÍGUEZ ROYO

Rector

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

VICTORIA CORTÉS MATAMOROS

Directora Departamento de Ambiente y Desarrollo

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Agradecimientos

Este estudio no se hubiera llevado a cabo sin el apoyo del Ingeniero Ariel Acosta, quien trabaja en el Proyecto de Gestión Participativa de la Microcuenca del río Uchapa, en Olanchito, Yoro, su disponibilidad y gentileza fueron de gran importancia para la investigación. Al Ingeniero Karbel Montes, Asistente de Nutrición Vegetal y Riego del Centro de Investigaciones de DOLE, al Ingeniero Walter Tizado, Gerente de Producción, al Ingeniero Roberto Ortiz y al personal de la Standard Fruit de Honduras S.A. S.A. conformado por Lelis Padilla, Orlando López, Marlon Fernando, Ronal Cruz, Yonin Ochoa, Daniel Ortiz, Raul Cortez, Elmer Martínez, Oscar Puerto, Alejandro Padilla, Allan Velásquez y Denis Solís, los cuales fueron muy atentos y tuvieron una gran disponibilidad en todo momento durante mi toma de datos. Por la ayuda incondicional y el apoyo del personal del Centro de Estufas y del Laboratorio de Agua y Energía del departamento de Ambiente y Desarrollo de Zamorano en la transición del estudio.

Contenido

Agradecimientos	3
Contenido.....	4
Índice de Figuras	6
Índice de Cuadros.....	7
Índice de Anexos	8
Resumen	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
Metodología.....	14
Área de Estudio.....	14
Cuantificación y Recolección de Residuos del Cultivo de Banano	15
Cuantificación de Residuos de Pinzote en la Planta Empacadora	15
Cuantificación de Residuos en Campo	16
Cuantificación del Material Vegetativo	17
Rendimiento de Biochar y Características Físicoquímicas del Pinzote de Banano y del Biochar	18
Caracterización Físicoquímica del Pinzote del Banano	19
Elaboración de biochar	20
Caracterización Físicoquímica del Biochar de Pinzote.....	22
Viabilidad Técnica para la Producción de Biochar y Beneficios en la Incorporación al Cultivo de Banano	23
Resultados y Discusión.....	24
Cuantificación y Generación Anual de Residuos del Cultivo de Banano	24
Rendimiento de Biochar Obtenido a través de Pirólisis Lenta y sus Características Físicoquímicas.....	27

Características Físicoquímicas del Pinzote de Banano.....	27
Rendimiento de Biochar	30
Caracterización Físicoquímica del Biochar de Pinzote de Banano.....	31
Evaluación de pH y los Nutrientes de Potasio (K ⁺), Calcio (Ca ⁺) y Sodio (Na ⁺) Presentes en el Biochar de Pinzote	32
Viabilidad Técnica para la Producción de Biochar y Beneficios en la Incorporación al Cultivo de Banano	34
Conclusiones	37
Recomendaciones.....	38
Referencias.....	39
Anexos.....	42

Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de localización de fincas	15
Figura 2 Partes de la Planta de Banano	18
Figura 3 Equipo para exprimir el pinzote de banano.....	21
Figura 4 Componentes de una planta de banano y residuos de cosecha generados.....	26
Figura 5 Racimos paridos y cosechados en las cinco fincas (2013-2022)	27

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Número de parcelas por tamaño de la finca	17
Cuadro 2 Métodos para el análisis fisicoquímico del pinzote de banano	20
Cuadro 3 Métodos para el análisis fisicoquímico del biochar	22
Cuadro 4 Propiedades fisicoquímicas del pinzote de banano	28
Cuadro 5 Contenido de fibra cruda del pinzote de banano.....	30
Cuadro 6 Concentración de poder calorífico del pinzote de banano y King Grass.....	30
Cuadro 8 Rendimiento en porcentaje del biochar de pinzote, palma aceitera y palmito de pijuayo por lote	31
Cuadro 9 Caracterización fisicoquímica del biochar de pinzote	32
Cuadro 10 Cuadro comparativo del contenido de carbono fijo en diferentes tipos de biochar	32
Cuadro 11 Aporte de nutrientes (kg) por 1 kg de biochar	34
Cuadro 12 Costo estimado de producción de biochar del pinzote de banano al año	35
Cuadro 13 Matriz de beneficios de la incorporación de biochar de pinzote de banano en el cultivo de banano	35

Índice de Anexos

Anexo A Residuos de pinzote de banano en las fincas de la Standard Fruit de Honduras S.A.....	42
Anexo B Entrevista semiestructurada sobre especificaciones del cultivo de banano en la empresa Standard Fruit de Honduras S.A.....	43
Anexo C Calendario de Apoyo y Cosecha PACA-ACARSA 2024.....	44
Anexo D Ejemplo de mapa dividido en secciones y número de cable vía en Palo Verde A	45
Anexo E Cable vía	46
Anexo F Pesaje de los residuos del banano	47
Anexo G Preparación y homogenización de la muestra de pinzote de banano	48
Anexo H Fórmulas de los parámetros determinados	49
Anexo I Resultados del análisis proximal del pinzote de banano a 105 °C, 600 °C y 900 °C.....	50
Anexo J Elaboración de láminas de metal para extracción de agua del pinzote	51
Anexo K Elaboración de biochar por pirólisis lenta	52
Anexo L Preparación de la muestra de biochar	53
Anexo M Resultados muestra de biochar a 105°C, 600°C y 900°C	54
Anexo N Flujo de proceso del método de extracción por medio de pasta saturada	55
Anexo O Flujo de proceso de extracción de minerales por el método de digestión con ácido nítrico	56
Anexo P Caracterización de biomasa lignocelulósica de los componentes de la planta de banano ...	57
Anexo Q Datos sobre el peso de cada sección de la planta de banano y finca a la que pertenece	58
Anexo R Registro de producción de biochar por lote	59

Resumen

La producción de banano en Honduras enfrenta desafíos en la gestión adecuada de los residuos orgánicos producidos, los cuales no se manejan de manera eficiente y contribuyen a la contaminación ambiental. La valorización de estos residuos a través de la producción de biochar representa una alternativa técnica viable para mejorar las propiedades del suelo, gracias a sus características nutricionales y fisicoquímicas. El objetivo general de este estudio es evaluar la producción de biochar a partir de residuos del pinzote de banano como una alternativa sostenible para la valorización de residuos en la empresa Standard Fruit de Honduras S.A. Para esto se caracterizó y estimó la disponibilidad estacional de la biomasa residual de pinzote en un ciclo anual. También se evaluó el rendimiento y las características fisicoquímicas del biochar obtenido por pirólisis lenta; finalmente se analizó la viabilidad técnica y los beneficios de incorporar el biochar en el cultivo de banano. Los resultados muestran que la generación de residuos es permanente, recolectando 10,036.96 t de pinzote en la empacadora en un ciclo anual. La producción de biochar alcanzó un rendimiento promedio del 20.10%, con un contenido de carbono fijo del 23.84% y un pH de 12, destacando su potencial en la remediación de suelos ácidos y la mejora de la fertilidad del suelo. La producción de biochar a partir de pinzote de banano es técnicamente viable, principalmente debido a la disponibilidad continua del residuo, lo que facilita su transformación para aplicaciones agrícolas posteriores.

Palabras clave: Biochar, economía circular, gestión de residuos orgánicos, pirólisis lenta

Abstract

Banana production in Honduras faces challenges in the proper management of organic residues produced, which are not efficiently managed and contribute to environmental pollution. The valorization of this waste through biochar production represents a viable alternative to improve soil properties, thanks to its nutritional and physicochemical characteristics. The general objective of this study is to evaluate the production of biochar from banana stem residues as a sustainable alternative for waste valorization at Standard Fruit of Honduras S.A. For this purpose, the seasonal availability of the residual banana stalk biomass in an annual cycle was characterized and estimated. The yield and physicochemical properties of biochar obtained by slow pyrolysis were also evaluated, and finally, the technical feasibility and benefits of incorporating biochar in banana production were analyzed. The results show that the generation of residues is permanent, collecting 10,036.96 tons of stalk residues in the post-harvest plant in an annual cycle. Biochar production reached an average yield of 20.10%, with a fixed carbon content of 23.84% and a pH of 12, highlighting its potential in the remediation of acid soils and the improvement of soil fertility. The production of biochar from banana stalk is technically feasible, due to the continuous availability of the residue, which facilitates its transformation for subsequent agricultural applications.

Keywords: Biochar, circular economy, organic waste management, slow pyrolysis

Introducción

El banano (*Musa paradisiaca* L.) es uno de los cultivos más importantes, con una producción mundial superior a 50 millones de toneladas, de las cuales el 40% proceden de Asia (Price, 1995). La producción de banano en América Latina y el Caribe, que alcanza aproximadamente 20 millones de toneladas, constituye entre el 80% y el 85% del total global de exportaciones. Además, Ecuador, Costa Rica y Colombia se encuentran entre los diez mayores exportadores a nivel mundial (Brenes y Madrigal, 2003).

De manera general, el banano es una planta perenne de tipo herbáceo que se caracteriza por tener un pseudotallo aéreo integrado por las vainas foliares que se enlazan de forma helicoidal. Las hojas son anfiestomáticas y tienen una capa de cera en su superficie. El órgano cormo tiene yemas terminales que están situadas en la parte opuesta a la base de base foliar (vaina). El sistema radicular es adventicio, la inflorescencia emerge en el pseudotallo y el fruto se forma por partenocarpia, es decir que la producción de frutos ocurre sin fertilización de óvulos y sin semillas (Sandoval y Müller, 1999).

Los problemas ambientales en producción de banano se asocian con prácticas de agricultura convencional como el uso de pesticidas, la deforestación, la pérdida de suelo, la deposición de los restos orgánicos y la contaminación del agua. Este tipo de agricultura es insostenible y sus efectos en algunos casos son irreversibles, como la destrucción de la soberanía alimentaria, erosión, contaminación, destrucción de suelos y una contribución al cambio climático (Carrera, 2015).

La producción de banano enfrenta desafíos en la gestión adecuada de los residuos orgánicos producidos, dado que no son aprovechados. Se estima que, por cada tonelada de bananos cosechados, se genera alrededor de cuatro toneladas de residuo lignocelulósico (Kasper Fernandes et al., 2013). Su acumulación provoca contaminación en aguas subterráneas y suelos, y su descomposición genera la proliferación de plagas y enfermedades (Haro-Velasteguí et al., 2017).

Además, estos procesos contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero, como metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂).

Los residuos orgánicos del banano representan una fuente importante de materia prima para su valorización, lo que consiste en aprovechar sus características fisicoquímicas para darle una utilidad como subproducto o reincorporarlos en el ciclo de producción. El pinzote de banano es el residuo más accesible, ya que se acumula en la planta post cosecha, las hojas y el pseudotallo que, se dejan en el campo como fuente de nutrientes para nuevas plantas de banano. El pinzote de banano con una composición de 30.6% de celulosa, 9.85% de lignina y 15.7% de hemicelulosa, ofrece oportunidades de transformación en subproductos como el biochar, el biogás, y la fabricación de papel y bioplásticos (Florez-Vargas et al., 2020).

La Standard Fruit de Honduras S.A. es una empresa dedicada a la producción a gran escala de banano, con una superficie de cultivo de 5,707.06 ha, lo cual representa un desafío para la gestión de residuos orgánicos generados. La empresa ha realizado investigaciones sobre alternativas que podrían implementar para aprovechar los residuos, así como la producción de biol, sin embargo, aún no se ha implementado en Honduras, por lo que se buscan más alternativas para asegurar una gestión eficiente y sostenible de los residuos.

El biochar se obtiene mediante procesos termoquímicos a través de una combustión parcialmente anaeróbica a temperaturas entre 300 y 500 °C. Es un material rico en material volátil con el potencial de secuestrar carbono y otros gases contaminantes. Además, contribuye a mejorar las características fisicoquímicas del suelo, pues regula su humedad, mejora el ciclo de nutrientes, ayuda con su estructura y reduce el uso de fertilizantes por su aporte de nutrientes. Barrezueta Unda et al. (2022), evaluaron el efecto del biocarbón (biochar) en el desarrollo de las plantas de banano (*Musa AAA*), concluyendo que la aplicación en el suelo contribuye a un mejor desarrollo vegetativo y un aumento en la altura de las plantas y el grosor del pseudotallo. Además, la presencia de los nutrientes en el biocarbón contribuye a una mejor asimilación de nutrientes por parte de las plantas.

Se consideró la empresa Standard Fruit de Honduras S.A. Para poner en práctica esta investigación. Considerando los beneficios asociados a este cultivo y la necesidad de incorporar prácticas que contribuyan a la sostenibilidad de este rubro productivo, esta investigación evalúa la producción de biochar a partir de residuos del pinzote de banano como alternativa de valorización para la empresa Standard Fruit de Honduras S.A., por medio de los siguientes objetivos específicos: 1) Caracterizar y estimar la disponibilidad estacional de biomasa residual del cultivo de banano de la empresa Standard Fruit de Honduras S.A. considerando un ciclo anual, 2) Estimar el rendimiento de biochar obtenido a través de pirólisis lenta y sus características fisicoquímicas y, 3) Analizar la viabilidad técnica de la empresa para la elaboración de biochar y los beneficios de su incorporación en el cultivo de banano.

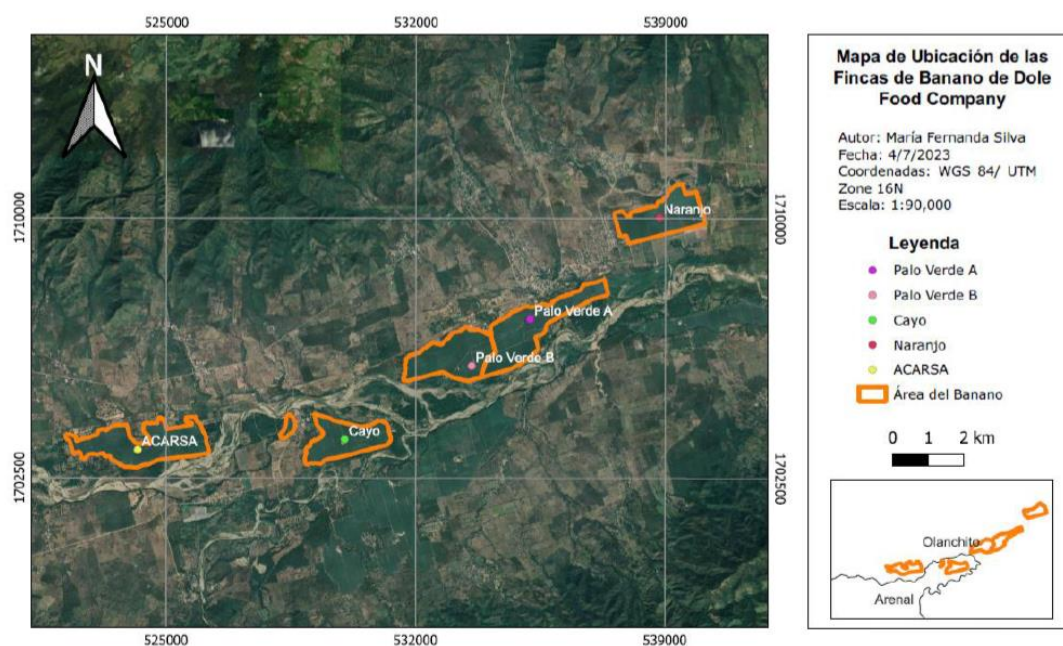
Metodología

Área de Estudio

El estudio se realizó en la empresa Standard Fruit de Honduras S.A., ubicadas en Coyoles Central, municipio de Olanchito, departamento de Yoro, Honduras. Sus coordenadas geográficas 15.48 N, -86.66 O, se ubica a una altura de 150 msnm, y su promedio de lluvia anual es de 1,000 mm. Se realizó una evaluación técnica de las fincas para analizar las condiciones de los cultivos, el área y la densidad, seleccionando cinco fincas de la zona baja por su estabilidad en la producción, para la cuantificación de la biomasa residual (Figura 1). Las fincas seleccionadas fueron la ACARSA (315.24 ha), Palo Verde A (300.83 ha), Cayo (194.80 ha), Palo Verde B (189.01 ha) y Naranja A (79.50 ha). Con un total de 1079.38 ha totales de área de producción. La toma de datos se realizó tanto en campo como en la empacadora de Palo Verde B, donde se tomó el pinzote que es el residuo de interés para esta investigación. La caracterización fisicoquímica de los residuos se realizó en el Laboratorio de Bioenergía del Departamento de Ingeniería en Ambiente y Desarrollo de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. Posteriormente, la elaboración del biochar se realizó en el Centro de Evaluación de Estufas Mejoradas (CEEM).

Figura 1

Mapa de localización de fincas



Nota. Tomado de Silva Garcés (2023)

Cuantificación y Recolección de Residuos del Cultivo de Banano

Se realizaron dos muestreos de acuerdo con la disposición de los residuos en la empresa (Anexo A). El muestreo en campo constó del pesaje de todos los componentes de la planta de banano, hojas, pseudotallo, pinzote completo, pinzote para empacadora, y frutos, los cuales quedan en campo una vez termina la cosecha. Al completar la cosecha, una sección del pinzote permanece como residuo en campo y la porción unida al fruto se lleva a la empacadora. En la planta empacadora se muestreó el pinzote, que consiste en una estructura alargada y fibrosa que sostiene los frutos del banano. Al retirar los racimos, la fracción restante se retorna al campo sin ningún otro proceso.

Cuantificación de Residuos de Pinzote en la Planta Empacadora

Se seleccionaron 10 pinzotes aleatoriamente para su caracterización en el Laboratorio de Bioenergía del Departamento de Ambiente y Desarrollo de la Escuela Agrícola Panamericana. Paralelamente, Se realizó una entrevista semiestructurada (Anexo B) al personal encargado de las actividades de Nutrición Vegetal y Riego del Centro de Investigaciones de DOLE, y producción. Se

realizó la consulta sobre la cantidad de racimos cosechados, las especificaciones de los ciclos de producción y el manejo del cultivo. Esta información fue necesaria para cuantificar el volumen de generación de residuos. Se consideró el peso promedio de cada pinzote y el promedio de la cantidad de racimos cosechados anualmente, ya que cada racimo equivale a un pinzote, por lo que se solicitó el registro de los racimos producidos y racimos cosechados durante 10 años (2013-2022) para los cálculos de generación de residuo de pinzote. Con estos datos, se obtuvo la Ecuación 1.

$$\text{Residuo pinzote anual } (t) = \text{Racimos cosechados} \times \text{Peso promedio de pinzote en planta } (t) \quad [1]$$

Cuantificación de Residuos en Campo

La empresa maneja las plantas de acuerdo con su edad y la semana de producción, marcándolas con cintas de diferentes colores (dorado, rojo, morado, amarillo, blanco, azul, verde y negro) conforme al Calendario de Apoyo y Cosecha Paca-ACARSA 2024 de la empresa (Anexo C). Las plantas están distribuidas por toda la finca sin mantener un patrón de siembra, encontrando de forma permanente plantas listas para cosecha con edades de 84, 91, 98 y 105 días. Las fincas se dividen en secciones (Anexo D) y número de cable vía (Anexo E), el cual transporta los racimos de banano hacia la planta de procesamiento.

El monitoreo en campo se realizó conforme a las zonas programadas para cosecha, seleccionando las plantas cosechadas para cuantificar el residuo remanente en campo. Se delimitó una parcela de 30 x 30 metros. Dentro de esta parcela, se enumeraron las plantas a cosechar. Posteriormente, se eligió una planta de forma aleatoria, obteniendo una planta por parcela, lo que resultó en un total de 11 muestras. Se realizó el muestreo de una parcela por cada 100 ha en una finca (Cuadro 1), ya que las fincas tienen un desarrollo bastante homogéneo, con siembra de una sola especie de banano.

Cuadro 1*Número de parcelas por tamaño de la finca*

Fincas	ACARSA	Palo Verde A	Palo Verde B	Cayo	Naranja A	Total
Hectáreas	315.24	300.83	189.01	194.80	79.50	1,289
Número de Parcelas	3	3	2	2	1	11

Cuantificación del Material Vegetativo

Para realizar el pesaje de toda la planta, primero se cortaron las hojas con una deshojadora, se contó el número de hojas, se cortaron en pedazos con un machete y se colocaron en un saco para ser pesadas. Posteriormente, luego se cortó el pinzote junto con el racimo. Se pesaron los bananos y se colocaron en un contenedor para luego ser llevados a la empacadora más cercana. Una vez el pinzote estuvo sin bananos, se pesó en dos partes: primero, el peso total del pinzote, y segundo, solo la parte que se lleva a la empacadora. Luego, se cortó el pseudotallo en partes con un machete y se pesó (Anexo F). Se utilizó una balanza Royal® con capacidad de 40 lb para obtener el peso de cada sección de la planta (Figura 2).

Figura 2

Partes de la Planta de Banano cuantificadas



Los resultados de la caracterización de residuos en campo se analizaron utilizando estadística descriptiva. Para el análisis de datos y la construcción de diagramas, se empleó Microsoft Excel 365™. Se calcularon medidas de tendencia central, como la media aritmética, y medidas de dispersión.

Rendimiento de Biochar y Características Físicoquímicas del Pinzote de Banano y del Biochar

El biochar es un tipo de carbón vegetal que se obtiene de biomasa residual y se elabora a través de un proceso de descomposición térmica como pirólisis o la carbonización, el cual consiste en la incineración de materia orgánica en un ambiente limitado de oxígeno a temperaturas relativamente bajas (< 700 °C) (Abdullah et al., 2023). A diferencia del biocarbón que es usado como biocombustible, este no se utiliza para quemar, sino como un subproducto que se utiliza para restaurar o mejorar las funciones del suelo, donde altera los procesos químicos, físicos y biológicos (Ulusal et al., 2021).

La pirólisis puede variar de acuerdo con la velocidad, temperatura y tiempo de residencia, que es lo que diferencia la pirólisis lenta y rápida. El tiempo de desarrollo se encuentra asociado con las características y capacidad del reactor pirolítico utilizado (Abdullah et al., 2023). En este estudio, se realizó un proceso de pirólisis lenta (Anexo K), por medio de un reactor pirolítico de ignición interna (Figura 3) que se calienta a temperaturas mayores de 300 °C elaborado por Pineda Rivera (2023).

Figura 3

Reactor pirolítico de ignición interna utilizado para producir biochar



Caracterización Físicoquímica del Pinzote del Banano

Preparación de la Muestra en Crudo.

Se obtuvieron 10 pinzotes tomados de manera aleatoria en la empacadora. Se les tomó la humedad al momento de su recolección para evitar el registro de datos erróneos por la pérdida de humedad durante el transporte. Los pinzotes recolectados se secaron a una temperatura ambiente durante una semana, hasta alcanzar una humedad del 20%. Luego, se cortaron en pedazos más pequeños y se mezclaron para homogeneizar la muestra. Seguidamente, la muestra se trituró con la licuadora Ninja® Professional Plus DUO® con Auto-iQ® hasta obtener partículas más finas. De los

residuos se obtuvieron cuatro muestras de pinzote de 16 g cada una, previamente trituradas y homogeneizadas (Anexo G), luego se transfirieron a una bolsa de plástico, la cual fue rotulada con la fecha de elaboración, el tipo de muestra y el nombre de la persona que realizó el proceso.

Análisis Fisicoquímicos del Pinzote de Banano.

Los análisis fisicoquímicos de las muestras en húmedo se realizaron conforme a los métodos descritos en el Cuadro 2, el cual, detalla el parámetro a realizar con su respectivo método descrito brevemente. Los análisis se realizan utilizando fórmulas (Anexo H) y métodos basados en normas estandarizadas internacionalmente (ASTM). Los resultados obtenidos fueron analizados mediante estadística descriptiva en el programa de *Microsoft Excel 365™* calculando la media, valor máximo y el valor mínimo de los datos obtenidos.

Cuadro 2

Métodos para el análisis fisicoquímico del pinzote de banano

Parámetro (%)	Método de análisis	Referencia
Humedad	Análisis gravimétrico por pérdida de peso	ASTM D3173-11
Ceniza	Análisis proximal estándar para carbón y coque	ASTM D3172-13
Carbono fijo	Métodos de prueba estándar para el análisis aproximado de la muestra de análisis de carbón y coque mediante procedimientos instrumentales	ASTM D5142-09
Poder calorífico	Método de prueba estándar para el poder calorífico bruto del carbón y el coque	Parr Modelo 6100
Fibra cruda	Método de luz infrarroja cercana	NIRS
Sólidos volátiles (MV)	Método para la determinación de materia seca luego de la evaporación del agua	ASTM D3175-18

Elaboración de biochar

Se tomaron 76 pinzotes de manera aleatoria en la empacadora de Palo Verde A sometiéndolos posteriormente a un proceso de prensado mecánico para remover el exceso de humedad contenida en el material. Para ello, se utilizaron dos láminas de metal de 15 × 35 cm, las cuales fueron pulidas y soldadas con puntos en toda su superficie para eficientizar la extracción del agua (Anexo J). Posteriormente, las láminas se colocaron en una prensa sujetadora con el pinzote entre ellas,

aplicando fuerza para extraer el agua (Figura 4). Se registró el peso del pinzote antes y después del prensado.

Figura 4

Equipo para exprimir el pinzote de banano



Se determinó el peso promedio de los pinzotes prensados a partir del peso individual de estos. Cada pinzote se dividió en cuatro secciones y se sometió a secado solar durante 7 días y se registró el peso de estos al concluir el periodo de secado. Finalmente, se realizó la incineración de los pinzotes en 3 lotes, en los cuales se registró el peso de pinzote seco y la leña utilizada para encender el reactor pirolítico en cada lote. Se registró el tiempo de incineración del material y se pesó la cantidad de biochar obtenida.

El rendimiento del biochar se determinó basándose en la proporción entre el peso del biochar y la biomasa seca y materia cruda mostrada en la Ecuación 2 y 3 (Amelia y Guerra, 2015). Este indica que tan eficaz es la biomasa para convertirse en biochar, por lo que muestra que tanto biochar se puede obtener por unidad de biomasa. Posteriormente, se estimó el rendimiento de biochar

conforme a la disponibilidad anual de los residuos del pinzote de banano.

$$\text{Rendimiento por materia seca (\%)} = \left(\frac{\text{Peso del biochar (lb)}}{\text{Peso de la biomasa seca (lb)}} \right) \times 100 \quad [2]$$

$$\text{Rendimiento por materia húmeda (\%)} = \left(\frac{\text{Peso del biochar (lb)}}{\text{Peso de la biomasa cruda (lb)}} \right) \times 100 \quad [3]$$

Caracterización Físicoquímica del Biochar de Pinzote

Preparación de la Muestra.

Los ensayos fueron realizados por triplicado en tres muestras de biochar las cuales se mezclaron para homogenizarlas. Se recolectó 50 gr de muestra de cada lote de producción, las cuales se molieron y se almacenaron en bolsas con cierre hermético. Luego, fueron analizadas sus características físicoquímicas (Anexo L).

Análisis Físicoquímicos del Biochar.

La calidad de las propiedades del biochar está relacionada con el potencial para influir en la mejora de las propiedades físicoquímicas del suelo. Esto se relaciona con los elementos principales, como el carbono fijo, la materia orgánica volátil, las cenizas y el contenido de humedad (Moreno Oliva, 2017). Se utilizó la metodología planteada en el Cuadro 2 descrito previamente, adicionando el ensayo de pH (Anexo N) y la digestión con ácido nítrico (Anexo O) para la obtención de la concentración de potasio (K⁺), calcio (Ca⁺) y sodio (Na⁺) a partir de los métodos presentados en el Cuadro 3.

Cuadro 3

Métodos para el análisis físicoquímico del biochar

Parámetros	Método de análisis	Referencia
pH	Método de extracción por medio de pasta saturada	Manssur Tomala (2020)
K ⁺ , Ca ⁺ y Na ⁺ (ppm)	Digestión con Ácido Nítrico de Metales	ASTM 3030 E

Para obtener los minerales presentes, se utilizaron los electrodos marca LAQUAtwin™ – Horiba con los modelos S022 para sodio, S030 para potasio y S050 para calcio. Los resultados obtenidos se evaluaron utilizando valores de referencia por medio de la literatura; además por medio de revisión de literatura se obtuvo información sobre el porcentaje de carbono fijo de biochar procedentes de otras materias primas. Para ello, se consultó información en Google Scholar™ utilizando las palabras clave: biochar, carbón vegetal y propiedades del biochar.

Viabilidad Técnica para la Producción de Biochar y Beneficios en la Incorporación al Cultivo de Banano

Se evaluó la viabilidad técnica de la empresa para la producción de biochar. Para ello se evaluó la viabilidad práctica, considerando la recolección y disposición actual del pinzote, así como la posibilidad de implementar el biochar en sus procesos productivos. Se identificó la disposición de insumos existentes y el interés de la empresa para elaborar este estudio mediante una entrevista semiestructurada (Anexo B).

Se estimaron los costos fijos y variables que conlleva la fabricación del raquis, clasificando los costos fijos en salarios del personal, adquisición de maquinaria, y el mantenimiento. En los costos variables se incluyó el costo de electricidad por el uso de la maquinaria. La información de los salarios se obtuvo por medio del pago semanal a los trabajadores en la empresa.

Adicionalmente, se recopilaron los beneficios asociados a la incorporación del biochar de pinzote al suelo para el cultivo de banano mediante una revisión de literatura. Esta revisión se llevó a cabo a través de la búsqueda de informes técnicos. Se utilizaron bases de datos académicas como *Google Scholar™* y *ScienceDirect*, empleando palabras clave específicas como biochar, pinzote, suelo y cultivo de banano. Se incluyeron estudios que demostraron los efectos positivos del biochar en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y cómo estas mejoras pueden reflejarse en beneficios para el cultivo de banano. Los criterios de inclusión abarcaron investigaciones publicadas en los últimos 10 años.

Resultados y Discusión

Cuantificación y Generación Anual de Residuos del Cultivo de Banano

Por medio de la entrevista semiestructurada se obtuvo que la variedad producida es Banano 6420 Enano Ecuatoriano, con un ciclo de producción de 34 - 36 semanas, y con una densidad de siembra de 1,550 plantas/ha. Además, es un cultivo perenne donde se deja un hijo para la continuidad del cultivo, lo que implica una generación constante de residuos y su permanencia en las parcelas.

La empresa implementa prácticas culturales en donde luego de la cosecha se deja el pseudotallo de la planta madre del banano en campo con el fin de darle los nutrientes necesarios al hijo para un mejor desarrollo y crecimiento. Debido a esto, el 95% del peso de la planta permanece en campo como residuo que se descompone a campo abierto (Ibarra Vallejo y Márquez Muñoz, 2022). La generación y acumulación de este material vegetal tiene efectos negativos en el ambiente y puede ocasionar la generación de hongos, enfermedades y atraer plagas que afectan la salud de las plantaciones (Haro-Velasteguí et al., 2017).

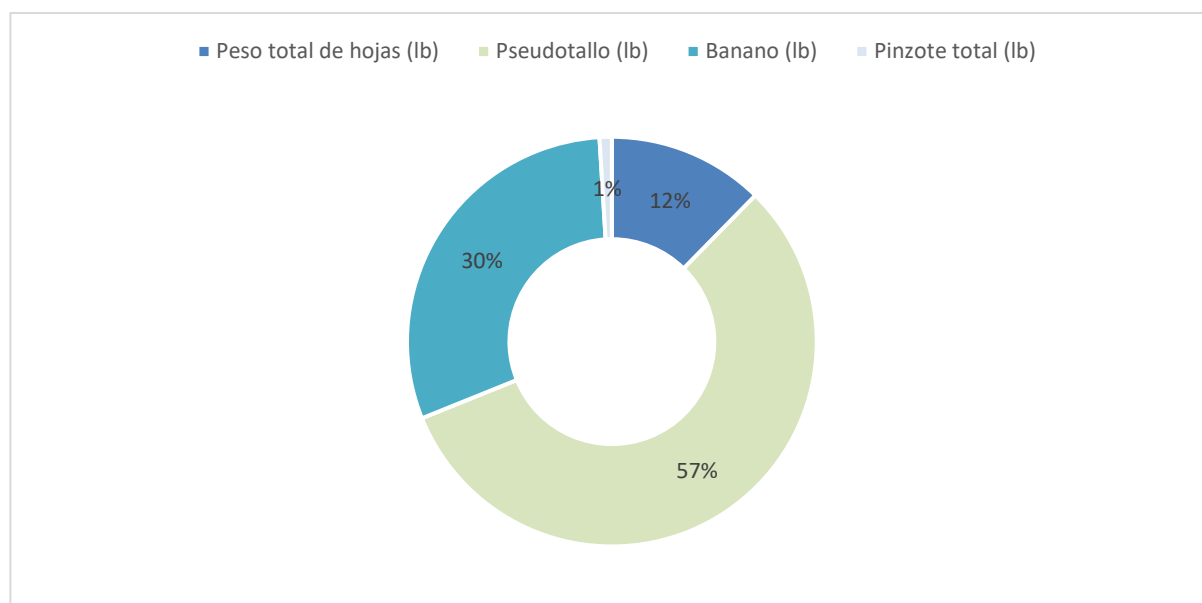
El peso promedio de una planta de banano al ser cosechada es de 246.22 lb, donde 166.79 se considera residual excluyendo el peso de los bananos y de los pinzotes llevados a la empacadora. Se observó diferencias en el peso de las plantas entre fincas, puesto que cada finca tenía diferente vigorosidad debido a las características de cada terreno. Palo Verde A, es la finca que presenta un área más frondosa y tiene mayor vigorosidad, por lo que tiene las plantas con mayores pesos. Palo Verde B presenta plantas menos vigorosas (Anexo Q). Esto podría ser respuesta de una combinación de factores, como los programas de fertilización de las fincas y la calidad de los suelos.

En la Figura 5 se observa la distribución porcentual de los componentes de la planta de banano, el 30% corresponden al peso de los racimos de banano comercializados. Por otro lado, el 70% restante, representa el peso del pseudotallo, hojas y pinzote. Siendo este gran porcentaje de peso, los residuos remanentes en campo.

La recolección de los residuos generados podría tener un efecto negativo en la dinámica actual de la empresa, debido al rol que la planta cosechada tiene en asegurar el desarrollo de la siguiente generación del cultivo. Por otra parte, incrementaría los costos operativos por el uso de personal y transporte adicional.

Figura 5

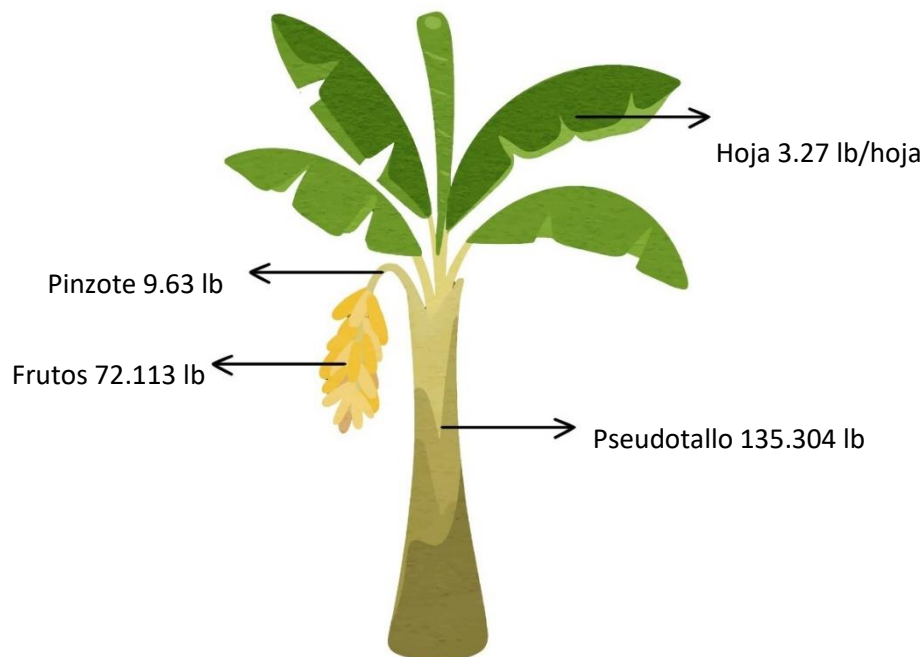
Promedio de peso de los componentes de la planta de banano en porcentaje



A partir de los datos obtenidos, se estimó el total de desechos generados de los componentes de una planta de banano (Figura 6), donde se observa que el pseudotallo es el residuo que más peso aporta. Esto puede ser útil para desarrollar estrategias de gestión y valorización de los residuos, permitiendo la aplicación de principios de economía circular que favorecen la sostenibilidad ambiental.

Figura 6

Componentes de una planta de banano y residuos de cosecha generados



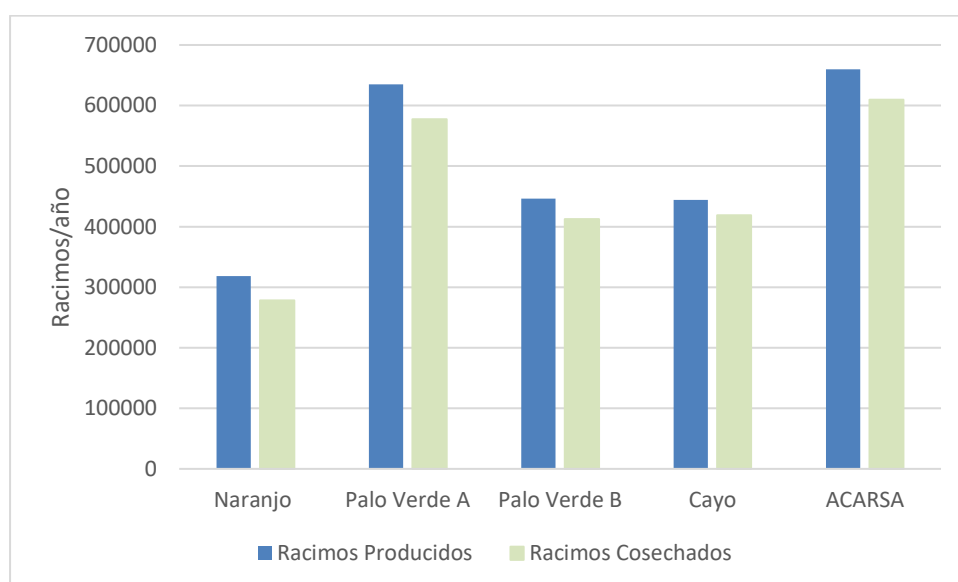
El porcentaje de plantas cosechadas tiene relación inversamente proporcional al aumento de la densidad de siembra. Esto se debe a la competencia de las plantas por nutrientes, sombra o la mayor propagación de plagas y enfermedades. Según el estudio de Belalcázar Carvajal (1991), la densidad de siembra de 1,666 plantas/ha, presenta un mayor porcentaje de plantas cosechadas y un mayor peso por racimo, en comparación con las densidades de 3,332 y 4,998 plantas/ha.

La empresa tiene una densidad de siembra de 1,550 plantas/ha, lo que es adecuado para un mejor manejo del cultivo y así evitar las pérdidas. Para estimar residuos de pinzote y del total de la planta en un ciclo anual, se consideraron los datos de la empresa a cerca de los racimos producidos y los racimos cosechados de cada finca, pues cada racimo cosechado se cuenta como una planta de banano desechada.

En la Figura 7 se presentan los datos correspondientes al período 2013 – 2022, así como el promedio de plantas que no llegaron a cosecharse debido a factores como plagas o enfermedades en la zona, problemas con la disponibilidad de nutrientes en el suelo, deficiencias en el drenaje y dificultades en el manejo del racimo durante la cosecha. En este período evaluado, se encontró que la finca con mayor porcentaje de pérdida es Naranja, debido a que en una parte de la finca se quiere establecer otro cultivo, por lo que no es una zona de interés para la empresa. Los racimos que no son cosechados contribuyen a la cantidad de residuos que permanecen en campo.

Figura 7

Unidad de racimos producidos y cosechados en las cinco fincas (2013-2022)



Por otra parte, se estima que el pinzote desechado en la empacadora es de 0.0033 t/planta.

Con base a la cantidad de racimos cosechados anuales, se obtuvo que el promedio de pinzote enviado a la empacadora es 7,623.29 t/año con una producción estimada de 635.27 t pinzote/mes.

Rendimiento de Biochar Obtenido a través de Pirólisis Lenta y sus Características Físicoquímicas

Características Físicoquímicas del Pinzote de Banano

Dado que el pinzote fue la materia prima para la producción de biochar, se llevó a cabo un análisis detallado de su composición para optimizar el proceso de producción y evaluar la efectividad

del proceso. Los residuos lignocelulósicos están formados por lignina y celulosa. La lignina es la parte rígida del residuo que protege la celulosa y la mantiene unida. La celulosa, constituida por unidades de glucosa, es el componente principal de todas las células vegetales (Loboguerrero, 2007). En los últimos años, la biomasa lignocelulósica ha ganado especial importancia debido a numerosos estudios que buscan sustituir los productos de fuentes no renovables por biomasa, especialmente aquella lignocelulósica residual. Este tipo de biomasa no pone en peligro la seguridad alimentaria ni provoca un incremento en las emisiones contaminantes (Ibarra Vallejo y Márquez Muñoz, 2022).

El pinzote de banano presenta 9.85% de lignina, 30.6% de celulosa y 15.7% de hemicelulosa (Anexo P) (Florez-Vargas et al., 2020). Las propiedades fisicoquímicas ayudan a determinar diferentes alternativas de aprovechamiento para su valorización. El bajo contenido de lignina hace al pinzote más susceptible a procesos de hidrólisis y degradación para la obtención de azúcares fermentables. El contenido de celulosa que posee es funcional para la producción de pulpa y papel, debido a que posee fibra. La cantidad de hemicelulosa que posee es intermedia, pero es adecuada para la producción de bioles, bioetanol y otros productos.

El Cuadro 4 presenta los resultados del análisis proximal del pinzote de banano, realizado en base seca (Anexo I). Además, muestra la variabilidad en los porcentajes de humedad, materia volátil, ceniza y carbono fijo entre las diferentes muestras analizadas, así como el promedio de estos valores.

Cuadro 4

Propiedades fisicoquímicas del pinzote de banano

ID	% Humedad	% Materia Volátil	% Ceniza	% Carbono fijo
Muestra 1	93.13	66.66	2.39	30.95
Muestra 2	92.70	71.73	2.34	25.92
Muestra 3	92.72	60.90	2.72	36.37
Muestra 4	92.93	74.99	2.39	22.61
Promedio	92.87	68.57	2.46	28.97

Debido a que el pinzote tiene una humedad inicial de 92.87%, es necesario realizar un proceso previo de secado para evitar efectos adversos en el desempeño de la producción de biochar. La humedad debe reducirse a un 25% como mínimo tras el secado para permitir procesos térmicos como la pirólisis (Nogales Delgado, 2015). Por otra parte, las cenizas son los residuos inorgánicos que permanecen en la muestra después de su ignición u oxidación de la materia (Arriaga Zacarias et al., 2022). Son compuestos no volátiles como sales, e iones por lo que brinda datos sobre el contenido de minerales presentes en la muestra. Para el caso del pinzote, se obtuvo una concentración inferior al 5%, lo que denota una baja concentración de estos elementos.

En el caso de la materia volátil se registró un promedio de 68.57%. Esto indica que tiene una alta carga orgánica, un buen potencial como bio-aceite y una alta degradación térmica (Kabenge et al., 2018). En adición, un alto contenido de carbono, como en este caso que es del 28.97% en promedio, puede significar una mayor estabilidad y capacidad de retener carbono en el suelo, usualmente para el biochar un rango óptimo es de 15 a 30%. Dado los análisis fisicoquímicos, el pinzote de banano tiene un alto potencial para la producción de biochar por sus características fisicoquímicas.

Seguidamente, el Cuadro 5 presenta el contenido de fibra cruda en el pinzote de banano. El análisis se expresa en gramos de fibra cruda por cada 100 gramos de muestra (g/100 g). Esto indica que, en cada 100 gramos de pinzote, 15.67 gramos corresponden a fibra cruda. La fibra cruda mide la cantidad total de componentes estructurales de las plantas como la celulosa, hemicelulosa y lignina, que constituyen los materiales lignocelulósicos. La fibra cruda influye en la calidad del biochar obtenido, y en el pinzote de banano indica que es un compuesto lignocelulósico. La estructura macro porosa del biochar producido por material lignocelulósico, proviene de la estructura de la materia prima, lo que es importante para la retención de agua y la capacidad de adsorción en el suelo (Moreno Oliva, 2017).

Cuadro 5

Contenido de fibra cruda del pinzote de banano

Tipo de análisis	Unidades	Concentración
Fibra cruda	g/100 g	15.67

Nota. Laboratorio de Análisis de Alimentos de la Carrera de Agroindustria Alimentaria

El poder calorífico es la cantidad de energía que contiene cierto material que puede ser liberada y utilizada durante el proceso de combustión (Tinoco Valarezo, 2017). Se comparó el poder calorífico del pinzote de banano con king grass (*Pennisetum purpureum*), que es un cultivo herbáceo destinado a la producción de energía (Cuadro 6). El pinzote de banano demuestra que es una fuente de energía viable por su poder calorífico, sin embargo, es menos eficiente que el *king grass*, además, el contenido de humedad de la biomasa es demasiado alto, por lo que no es factible emplearlo para la generación de energía.

Cuadro 6

Concentración de poder calorífico del pinzote de banano y King Grass

Tipo de análisis	Concentración (kJ/kg)	Referencia
Pinzote de banano	10,250	Laboratorio de Análisis de Alimentos, Carrera de Agroindustria Alimentaria
King grass (<i>Pennisetum purpureum</i>)	14,000 – 21,000	Tinoco Valarezo (2017)

Rendimiento de Biochar

El porcentaje de rendimiento de biochar obtenido a partir de la materia seca después del proceso de pirólisis es en promedio 20.10% (Cuadro 8). Por lo que se obtendría 0.2 t biochar por 1 t de pinzote seco. Esto es comparable con los rendimientos del peciolo de la palma aceitera y el raquis del palmito de pijuayo obtenidos por Amelia y Guerra (2015), el biochar de banano se encuentra en un rango competitivo para la producción de biochar. Además, el rendimiento promedio obtenido a partir de la materia cruda es del 7.33 %, por lo que se obtendría 0.096 t de biochar por 1 t de pinzote crudo. Por medio de ello, se estima que la generación de biochar anual es de 731.88 t de biochar/año.

Se utilizó aproximadamente 1.04 lb de leña/lb de pinzote seco para el uso del reactor pirolítico (Anexo R). Nebraska Forest Service (s.f) sugiere la aplicación de 7.41 t/ha/año para mejorar los niveles de materia orgánica y el hábitat de los organismos en el suelo. De acuerdo con lo encontrado para cumplir con la dosis recomendada, se necesita 7,998.2 t de biochar/año en 1,079.38 ha de producción de banano en la empresa. A partir del rendimiento se estaría cubriendo el 9.15% de la dosis recomendada para el mejoramiento de la materia orgánica en el suelo.

Cuadro 7

Rendimiento en porcentaje del biochar de pinzote, palma aceitera y palmito de pijuayo por lote

Materia prima	Pinzote de banano ¹	Pecíolo de palma aceitera ²	Raquis de palmito de pijuayo ²
Promedio de rendimiento (%)	20.1	25.4	17.8

Nota. Elaboración propia¹, obtenido de Amelia y Guerra (2015)².

Caracterización Físicoquímica del Biochar de Pinzote de Banano

Las características físicoquímicas del biochar son fundamentales para evaluar su calidad y su aporte en la incorporación al suelo. El Cuadro 9 muestra los resultados de tres muestras analizadas (Anexo M) que determinan la humedad, materia volátil, ceniza y carbono fijo de cada una. Los datos indican que hay variación en estos parámetros entre las muestras.

A medida que aumenta la temperatura de pirólisis, la proporción de carbono aromático se eleva y el contenido de materia volátil disminuye (Baldock y Smernik, 2002), el incremento de carbono aromático confiere al biochar una mejor estabilidad química y una mejor capacidad para actuar como sumidero de carbono. Según Moreno Oliva (2017), el contenido de cenizas aumenta con la temperatura. Su contenido de cenizas indica una mayor concentración de nutrientes y minerales, que son beneficiosos para el suelo. Amelia y Guerra (2015) menciona que los principales niveles presentes en las cenizas son el calcio (Ca), potasio (K), sodio (Na), magnesio (Mg), silicio (Si), y en menores cantidades, fósforo (P), azufre (S), aluminio (Al), hierro (Fe) y manganeso (Mn), lo que influye en el aporte de nutrientes a las plantas y mejora la fertilidad del suelo.

Cuadro 8*Caracterización fisicoquímica del biochar de pinzote*

N. Muestra	Humedad	Materia Volátil (%)	Ceniza (%)	Carbono fijo (%)
M.1	1.24	24.78	48.92	25.06
M.1	1.02	26.25	48.14	24.59
M.1	1.07	26.94	49.60	22.39
M.2	1.32	18.20	51.80	28.68
M.2	1.50	18.80	50.21	29.49
M.2	1.59	16.93	53.06	28.41
M.3	0.70	19.34	58.13	21.83
M.3	0.32	18.36	65.39	15.94
M.3	0.38	17.87	63.59	18.16
Promedio	1.02	20.83	54.32	23.84

Nota. M = Muestra.

El contenido de carbono fijo en el biochar de pinzote de banano es relativamente moderado en comparación con otros tipos de biochar, encontrándose un promedio de 23.84% (Cuadro 10). El menor contenido de carbono fijo se encuentra en el biochar de pinzote de banano, esto indica que tiene una menor capacidad para almacenar carbono, sin embargo, su aporte sigue siendo valioso.

Cuadro 9*Cuadro comparativo del contenido de carbono fijo en diferentes tipos de biochar*

Tipo de biochar	Biochar de cáscara de sachá inchi ¹	biochar de cascarilla de arroz ¹	Biochar de cáscara de cacao ¹	Biochar de pinzote de banano ²
Contenido de carbono fijo (%)	89.47	34.92	47.22	23.84

Nota. Obtenido de Amelia y Guerra (2015)¹, elaboración propia².

Evaluación de pH y los Nutrientes de Potasio (K⁺), Calcio (Ca⁺) y Sodio (Na⁺) Presentes en el Biochar de Pinzote

Los resultados obtenidos de la extracción acuosa dieron como resultado que el biochar tiene características alcalinas con un pH de 12, lo que le confiere un potencial uso como enmienda para regulación de acidez en el suelo. Las necesidades nutricionales del cultivo de banano son muy grandes

si se produce a gran escala. Con cada cosecha se extraen grandes cantidades de elementos, en especial el potasio. El nutriente con más importancia en la producción de banano es el potasio por la demanda que la planta requiere. Incluso si el suelo tiene nutrientes altos de carbono, aún el banano requiere de un buen suplemento de potasio (López y Espinoza, 1998).

El calcio, es absorbido en forma de ión Ca^{2+} . Es un elemento estructural, conforma las paredes y las membranas celulares, también interviene en la división y expansión de las células, regula la acción de hormonas y estabiliza la pared y la membrana (Díaz et al., 2007). En el caso del sodio, puede ser contraproducente tener altas cantidades de sodio, puesto que el banano es sensible al sodio. Por lo que si el biochar que es elaborado con pinzotes de las fincas de banano tienen altas concentraciones de sodio, puede que estén teniendo problemas con la salinidad de los suelos.

El Cuadro 11 presenta los nutrientes que se obtuvieron en el método de extracción ácida, que indican cuantos kilogramos de nutrientes aporta 1 kg de biochar, Los valores muestran las cantidades promedio de sodio (Na^+), potasio (K^+) y calcio (Ca^+) suministrados por el biochar, con datos detallados para cada lote y el promedio general. Las variaciones entre lotes de biochar pueden deberse por las diferencias en las condiciones de producción, como la temperatura y el tiempo de la incineración. Gutiérrez Avellán (2020), sugiere la incorporación de 0.6 t de potasio/ha para el crecimiento y desarrollo correcto del cultivo de banano. De acuerdo con lo encontrado para cumplir con la dosis recomendada, se necesita 647.63 t de potasio/año en 1,079.38 ha de producción de banano en la empresa. A partir de la producción de biochar anual se estaría produciendo 69.53 t de potasio/año, cubriendo el 10.74% de la dosis recomendada, reduciendo la cantidad de potasio por medio de fertilizantes químicos.

Cuadro 10

Aporte de nutrientes (kg) por 1 kg de biochar

Lote	Na ⁺ (kg)	K ⁺ (kg)	Ca ⁺ (kg)
1	0.109	0.116	0.00419
2	0.081	0.106	0.0029
Promedio	0.095	0.111	0.00354

Viabilidad Técnica para la Producción de Biochar y Beneficios en la Incorporación al Cultivo de Banano

Por medio de la entrevista semiestructurada, el Centro de Investigaciones de la empresa expresó su interés en la elaboración de biochar, pues posee interés en el máximo aprovechamiento del residuo para la reintegración de nutrientes al suelo y la gestión adecuada del residuo.

La empresa Standard Fruit de Honduras S.A. previo a realizar una inversión, realiza un análisis de viabilidad técnica para poder ver el aporte de la implementación de esta práctica al rendimiento. Posteriormente, realiza un análisis financiero, el cual consiste en comprobar si la práctica o tecnología a implementar reduce costos o incrementa beneficios en la producción del banano. Por lo cual, se está realizando constantemente inversión en el desarrollo de investigaciones. Los resultados de este estudio pueden contribuir a estos análisis que realiza la empresa.

Para la producción del biochar se necesita el uso de un reactor pirolítico, el cual representa la inversión principal de esta propuesta. Para ello se consideró la producción de residuos de pinzote mensual (635.27 t/mes). Se consideró el reactor pirolítico de Sunrise® Global Trade and Industry que tiene una capacidad de 1,000 kg/h. Este reactor consta de tres etapas, pretratamiento, carbonización y tratamiento de los gases de escape. La potencia del reactor es de 86.75 kW, se estima un uso de 8 horas al día por los 7 días a la semana, y un valor de USD 0.18 dólares el kWh. A partir de las características encontradas en la cotización del reactor pirolítico, se estimaron los costos presentados en el Cuadro 12. El costo de mano de obra de la recolección de los residuos de pinzote en campo no

se tomó en cuenta, debido a que se tiene la ventaja de que el pinzote del banano es transportado a la planta de postcosecha, donde se separa de los racimos de banano.

Cuadro 11

Costo estimado de producción de biochar del pinzote de banano al año

Costos fijos	Unidad	Cantidad	Total anual (USD)
Mano de obra trabajadores	Trabajador	1	9449.23
Maquinaria	Reactor	1	83,950.00
Mantenimiento	Inversión	10%	8,395.00
Costos variables			
Electricidad	Horas	2,688	45,595.80
Total			147,390.03

En el Cuadro 13 se detallan los beneficios que se obtienen al incorporar biochar en el suelo, basados en una revisión de literatura. La Standard Fruit de Honduras S.A. piensa establecer un sistema de aprovechamiento de los residuos del pinzote de banano a través de la producción de biol. Algunos investigadores recomiendan la simbiosis del biochar con bioles para beneficio del suelo y de las plantas (Barrezueta Unda et al., 2022). La incorporación del biochar en el suelo aportará al ciclo de producción del cultivo en la empresa, lo que permitirá la reducción de usos de fertilizantes, a través de una mejor retención y aporte de nutrientes, además de contribuir a una agricultura más sostenible y a una economía circular.

Cuadro 12

Matriz de beneficios de la incorporación de biochar de pinzote de banano en el cultivo de banano

Beneficio	Componente	Aplicación	Referencia
Mejora la calidad del suelo	Biochar con pH alcalino	Aplicación como enmienda para elevar el pH de suelos ácidos	Barrezueta Unda et al. (2022)
Incrementa la retención de carbono en el suelo	Estructura recalcitrante	Reducción de la concentración de CO ₂ en la atmósfera	Barrezueta Unda et al. (2022)
Mejora la estructura del suelo	Biochar	Mejora de la retención de agua, reducción de densidad aparente y mejoramiento de la porosidad	Olmo Prieto (2016)
Facilita el desarrollo radicular y crecimiento microbiano	Biochar	Aumento de la infiltración de agua y mejora de la oxigenación del suelo	Olmo Prieto (2016)
Aumenta el drenaje en suelos húmedos	Biochar	Mejora el drenaje, beneficiando el crecimiento de plantas de banano	Olmo Prieto (2016)

La producción de residuos de pinzote de banano asegura su disponibilidad y accesibilidad permanente, por lo que ofrece una valiosa oportunidad para su reutilización en la producción de biochar. La gestión adecuada de este residuo disminuye el volumen de los residuos generados y fomenta prácticas sostenibles que están alineadas con los objetivos de sostenibilidad y la estrategia de producción de la empresa.

Conclusiones

La caracterización de la biomasa residual determinó que el cultivo de banano produce 635.27 t de pinzote al mes, con un potencial de generar 60.99 t de biochar mensuales de forma permanente.

Conforme a las características fisicoquímicas obtenidas se identifica que el biochar es adecuado para enmiendas de suelos ácidos por su alta alcalinidad, contribuyendo principalmente con nutrientes como el potasio para el mantenimiento del cultivo de banano. Además, por cada tonelada de pinzote crudo se produce 0.0967 t de biochar, posicionándose como una materia prima competitiva en comparación con otros residuos agrícolas.

La producción de biochar a partir del pinzote de banano es viable tanto económica como ambientalmente, debido a la disponibilidad y fácil acceso de forma permanente al residuo. Además, aprovechar el uso de estos residuos contribuye a la gestión sostenible de desechos, reduciendo la acumulación de material orgánico y minimizando el impacto ambiental. Esta práctica está alineada con el plan de acción de la empresa y su rubro productivo.

Recomendaciones

Evaluar el potencial de valorización de los residuos remanentes en campo para identificar nuevas oportunidades de reutilización y optimización de su gestión.

Realizar un análisis financiero para evaluar la viabilidad y rentabilidad de la producción de biochar a partir del pinzote de banano y poder contabilizar las externalidades positivas y negativas asociadas con el producto.

Usar un reactor pirolítico que controle de manera precisa el tiempo de producción de biochar, las velocidades de calentamiento y el nivel de temperatura, así como que permita aprovechar los subproductos obtenidos durante la pirolisis, como el aceite y los gases pirolíticos.

Referencias

- Abdullah, N., Mohd Taib, R., Mohamad Aziz, N. S., Omar, M. R. y Md Disa, N. (2023). Banana pseudo-stem biochar derived from slow and fast pyrolysis process. *Heliyon*, 9(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12940>
- Amelia, P. y Guerra, L. (2015). *Producción y caracterización de Biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonía Peruana* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/1895/Q70.G84-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arriaga Zacarias, L. Y., Mejia Sandoval, L. G., Noriega Yoc, J. A., Ramírez Isep, R. y Velázquez León, M. A. (2022). *Determinación de cenizas y humedad en los alimentos*. Instituto Tecnológico de Tapachula. <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-tecnologico-de-tapachula/analisis-de-alimentos/determinacion-de-ceniza-y-humedad/45632762>
- Baldock, J. A. y Smernik, R. J. (2002). Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. *Organic Geochemistry*, 33(9), 1093–1109. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00062-1](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00062-1)
- Barrezueta Unda, S., Condoy-Gorotiza, A. y Sánchez-Pilcorema, S. (2022). Efecto del biocarbón en el desarrollo de las plantas de banano (*Musa AAA*) en fincas a partir de un manejo orgánico y convencional. *Enfoque UTE*, 13(3). <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.815>
- Belalcázar Carvajal, S. L. (1991). *El Cultivo de Plátano (Musa AAB Simmonds) en el Trópico*. Instituto Colombiano Agropecuario. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/12434>
- Brenes, E. R. y Madrigal, K. (2003). Banana trade in Latin America. En T. E. Josling y T. G. Taylor (Eds.), *Banana wars: the anatomy of a trade dispute* (pp. 97–121). CABI Publishing. <https://doi.org/10.1079/9780851996370.0097>
- Carrera, R. (2015). *Las insostenibilidad de los monocultivos agro-industriales -mayoritariamente destinados a la exportación como la palma de aceite*. https://www.ecologistasenaccion.org/wp-content/uploads/adjuntos-spip/pdf/Las_insostenibilidad_de_los_monocultivos_agroalimentarios.pdf
- Díaz, A., Cayón, G. y Mira, J. J. (2007). Metabolismo del calcio y su relación con la “mancha de madurez” del fruto de banano. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 25(2), 280–287. <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v25n2/v25n2a10.pdf>
- Florez-Vargas, A. O., Sánchez-Molina, J. y Sánchez-Zuñiga, J. V. (2020). Caracterización de los residuos de la cosecha del plátano harton para un potencial uso industrial. *AiBi Revista De Investigación, Administración E Ingeniería*, 8(3), 13–16. <https://doi.org/10.15649/2346030X.821>
- García Bautista, R. M., Quevedo Guerrero, J. N. y Socorro Castro, A. R. (2020). Prácticas para el aprovechamiento de residuos sólidos en plantaciones bananeras y resultados de su implementación. *Revista Científica Universidad De Cienfuegos Universidad Y Sociedad*, 12(1), 280–291.

- https://www.researchgate.net/publication/343523476_Practicas_para_el_aprovechamiento_de_residuos_solidos_en_plantaciones_bananeras_y_resultados_de_su_implementacion
- Gutiérrez Avellán, K. A. (2020). *Importancia del potasio en el crecimiento y desarrollo en el cultivo de banano (Musa AAA)* [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica de Babahoyo, Ecuador. <http://dspace.utb.edu.ec/bitstream/handle/49000/8502/E-UTB-FACIAG-ING%20AGROP-000104.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Haro-Velasteguí, A. J., Borja-Arévalo, A. E. y Triviño-Bloisse, S. Y. (2017). Análisis sobre el aprovechamiento de los residuos del plátano, como materia prima para la producción de materiales plásticos biodegradables. *Dominio De Las Ciencias*, 3(2), 506–525. <https://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/435>
- Ibarra Vallejo, M. A. y Márquez Muñoz, L. I. (2022). Identificación de usos potenciales para el aprovechamiento de los residuos generados en el proceso de beneficio del plátano (*Musa paradisiaca*) var. Hartón. *CEI Boletín Informativo*, 9(2), 181–188. <https://revistas.umariana.edu.co/index.php/BoletinInformativoCEI/article/download/3179/3479/7851#:~:text=En%20los%20procesos%20de%20cosecha,Gobernaci%C3%B3n%20de%20Nari%C3%B1o%2C%202019>
- Kabenge, I., Omulo, G., Banadda, N., Seay, J., Zziwa, A. y Kiggundu, N. (2018). Characterization of banana peels wastes as potential slow pyrolysis feedstock. *Journal of Sustainable Development*, 11(2). https://www.researchgate.net/publication/324119052_Characterization_of_Banana_Peels_Wastes_as_Potential_Slow_Pyrolysis_Feedstock
- Kasper Fernandes, E. R., Marangoni, C., Souza, O. y Sellin, N. (2013). Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. *Energy Conversion and Management*, 75, 603–608. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.008>
- Loboguerrero, C. (2007). *Exploración de la factibilidad del aprovechamiento de los residuos de la extracción de aceite de palma para convertirlos en azúcares fermentables* [Tesis de pregrado]. Universidad de los Andes, Colombia. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/90664d49-6dad-42cc-a27b-f4f8d135ed79/content>
- López, A. y Espinoza, J. (1998). *Respuesta del banano al potasio*. International Plant Nutrition Institute. [http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/02788fd8caeaf69705257a370058dad2/\\$FILE/Respuestabanano.pdf](http://nla.ipni.net/ipniweb/region/nla.nsf/e0f085ed5f091b1b852579000057902e/02788fd8caeaf69705257a370058dad2/$FILE/Respuestabanano.pdf)
- Moreno Oliva, J. (2017). *Producción y caracterización de biochar derivado de sarmiento de viña (vitis vinifera). Estudio preliminar de su aplicación sobre el desarrollo de plantas gramíneas* [Tesis de pregrado]. Universidad Zaragoza, España. <https://zaguan.unizar.es/record/64725/files/TAZ-TFG-2017-5062.pdf>
- Nogales Delgado, S. (2015). *Reducción de las emisiones asociadas a la combustión y pirólisis de biomasa mediante diversos métodos* [Tesis doctoral]. Universidad de Extremadura, España. https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/4377/1/TDUEX_2016_Nogales_Delgado.pdf
- Olmo Prieto, M. (2016). *Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal* [Tesis doctoral]. Universidad de Córdoba, España.

<https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/13381/2016000001398.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Pineda Rivera, A. N. (2023). *Propuesta para el aprovechamiento de residuos de hoja de palma como biocombustible sólido para su valorización y minimización en Zamorano, Honduras* [Proyecto especial de graduación]. Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/d603e950-9905-42db-994f-1dacbb39b0bd/content>
- Price, N. S. (1995). The origin and development of banana and plantain cultivation. En S. Gowen (Ed.), *Bananas and Plantains* (pp. 1–13). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0737-2_1
- Sandoval, J. A. y Müller, L. (1999). Anatomía y morfología de la planta de banano (*Musa AAA*). *Corbana*, 24(51), 43–60. <https://www.musalit.org/seeMore.php?id=6554>
- Silva Garcés, M. F. (2023). *Huella Hídrica del cultivo de piña (Ananas comosus) y banano (Musa paradisiaca) de la empresa Dole Food Company en la Zona Norte de Honduras* [Proyecto especial de graduación]. Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/90f142dc-47de-4b24-b202-f6bcdf2b6756/content>
- Tinoco Valarezo, J. S. (2017). *Evaluación de la influencia de la fertilización potásica en el poder calorífico del King Grass (Pennisetum purpureum)* [Proyecto especial de graduación]. Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras. [https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/270af0ae-9468-43b7-bcb5-59e005427791/content#:~:text=Un%20estudio%20enfocado%20en%20la,\(Mu%C3%B1oz%20Lardizabal%20y%20Fanconi%20](https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/270af0ae-9468-43b7-bcb5-59e005427791/content#:~:text=Un%20estudio%20enfocado%20en%20la,(Mu%C3%B1oz%20Lardizabal%20y%20Fanconi%20)
- Ulusal, A., Apaydin Varol, E., Bruckman, V. J. y Uzun, B. B. (2021). Opportunity for sustainable biomass valorization to produce biochar for improving soil characteristics. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(3), 1041–1051. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00923-7>

Anexos

Anexo A

Residuos de pinzote de banano en las fincas de la Standard Fruit de Honduras S.A.



Anexo B

Entrevista semiestructurada sobre especificaciones del cultivo de banano en la empresa Standard

Fruit de Honduras S.A.

Preguntas guías:

1. ¿Cuántas hectáreas de banano tienen plantadas?
2. ¿Cuál es la densidad de siembra del cultivo?
3. ¿Cuál es la duración de un ciclo de rotación de banano en la finca?
4. ¿En cuánto tiempo las plantas están listas para ser cosechadas?
5. ¿Qué variedades de banano manejan en la finca?
6. ¿Cuál es la proporción de cultivo por variedad? ¿Por qué?
7. ¿Cuál es la cantidad promedio de residuos generados por hectárea de banano en su finca en un año?
8. ¿Cuál es el manejo de esos residuos?
9. ¿Usan fertilizantes o pesticidas químicos? ¿Cuáles? ¿En qué cantidades?
10. ¿Cómo fertiliza el cultivo?
11. ¿Qué prácticas de sostenibilidad realizan en su finca?
12. ¿Cuánto personal se necesita para el manejo de la finca en todo el ciclo de producción?
13. ¿Cómo están distribuidos los roles de cada persona?
14. ¿Cuánto cuesta un jornal de trabajo?
15. ¿Están interesados en fabricar biochar para incorporarlo a su sistema productivo?

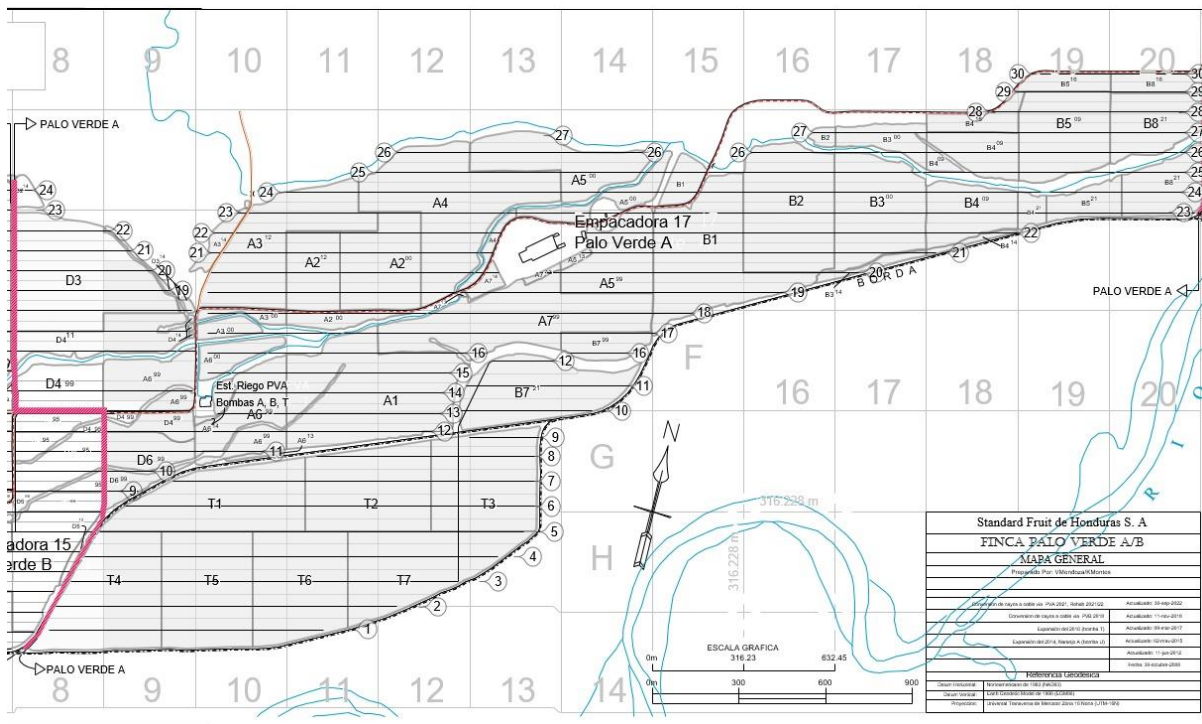
Anexo C

Calendario de Apoyo y Cosecha PACA-ACARSA 2024

CALENDARIO DE APOYO Y COSECHA PACA-ACARSA 2,024															
Prem.	Pres.	Ant.	Edades (Dias)						SEMANAS						
0	7	14	21	28	35	42	49	56							
56	63	70	77	84	91	98	105	112							
Dorada	Roja	Mora.	Amar	Blanca	Azul	Verde	Negra	Dorada	1	9	17	25	33	41	49
Negra	Dorada	Roja	Mora.	Amar	Blanca	Azul	Verde	Negra	2	10	18	26	34	42	50
Verde	Negra	Dorada	Roja	Mora.	Amar	Blanca	Azul	Verde	3	11	19	27	35	43	51
Azul	Verde	Negra	Dorada	Roja	Mora.	Amar	Blanca	Azul	4	12	20	28	36	44	52
Blanca	Azul	Verde	Negra	Dorada	Roja	Mora.	Amar.	Blanca	5	13	21	29	37	45	1
Amar	Blanca	Azul	Verde	Negra	Dorada	Roja	Mora.	Amar.	6	14	22	30	38	46	2
Mora.	Amar	Blanca	Azul	Verde	Negra	Dorada	Roja	Mora.	7	15	23	31	39	47	3
Roja	Mora.	Amar	Blanca	Azul	Verde	Negra	Dorada	Roja	8	16	24	32	40	48	4

Anexo D

Ejemplo de mapa dividido en secciones y número de cable vía en Palo Verde A



Anexo E

Cable vía



Anexo F

Pesaje de los residuos del banano



Anexo G*Preparación y homogenización de la muestra de pinzote de banana*

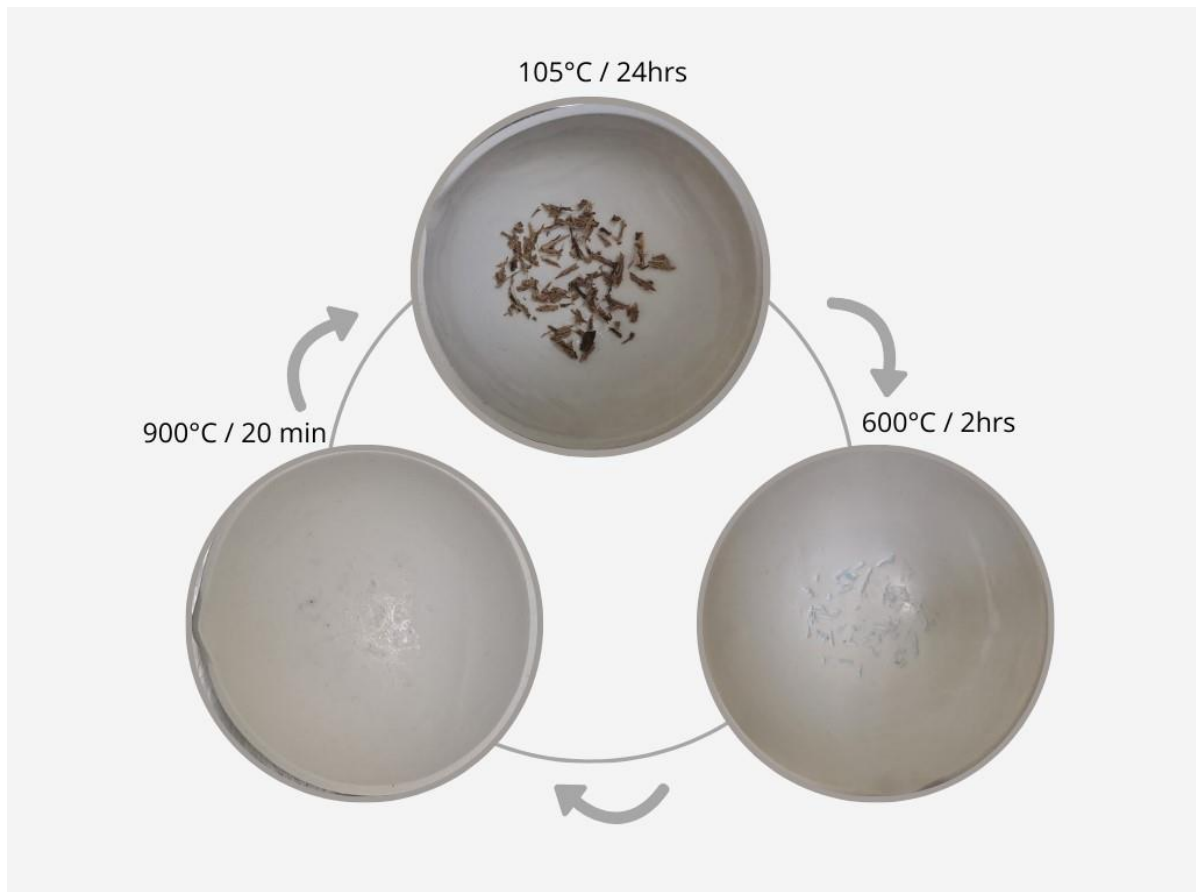
Anexo H

Fórmulas de los parámetros determinados

Nombre del parámetro	Humedad	Cenizas	Masa Perdida	Materia Volátil	Carbono fijo
Fórmula	$\text{Humedad en (\%)} = \left[\frac{(A - B)}{A} \right] \times 100$	$\text{Cenizas (\%)} = \left[\frac{(A - B)}{C} \right] \times 100$	$\text{Masa perdida (\%)} = 100 \times \left[\frac{(B - C)}{(B - A)} \right]$	$\text{Materia volátil (\%)} = D - E$	$\text{Carbono fijo (\%)} = 100 - (\% H + \% C + \% MV)$
Significado	<p>A = Gramos de muestra utilizados</p> <p>B = Gramos de muestra después del calentamiento</p>	<p>A = Gramos del crisol con residuo de ceniza</p> <p>B = Gramos del crisol vacío</p> <p>C = Peso de la muestra de análisis</p>	<p>B = Gramos del crisol con muestra antes de incineración</p> <p>C = Gramos del crisol con muestra después de incineración</p>	<p>D = Porcentaje de materia perdida</p> <p>E = Porcentaje de humedad en la muestra</p>	<p>H = Humedad</p> <p>C = Cenizas</p> <p>MV = Materia Volátil</p>

Anexo I

Resultados del análisis proximal del pinzote de banana a 105 °C, 600 °C y 900 °C



Anexo J

Elaboración de láminas de metal para extracción de agua del pinzote

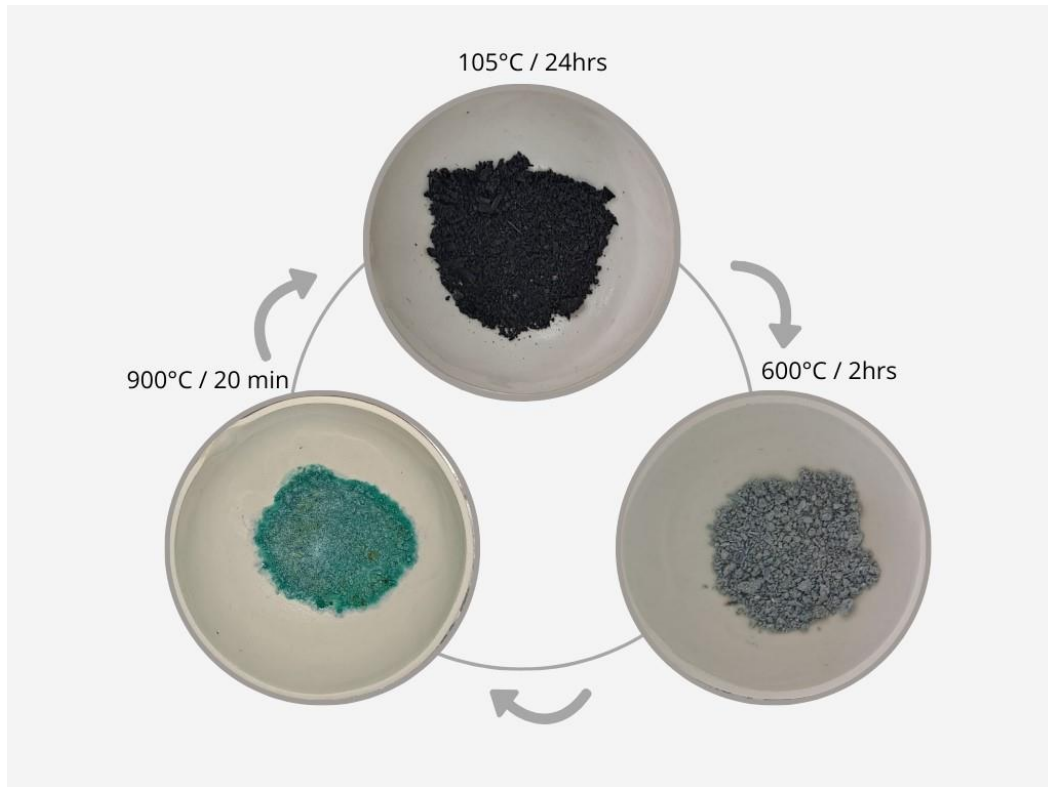


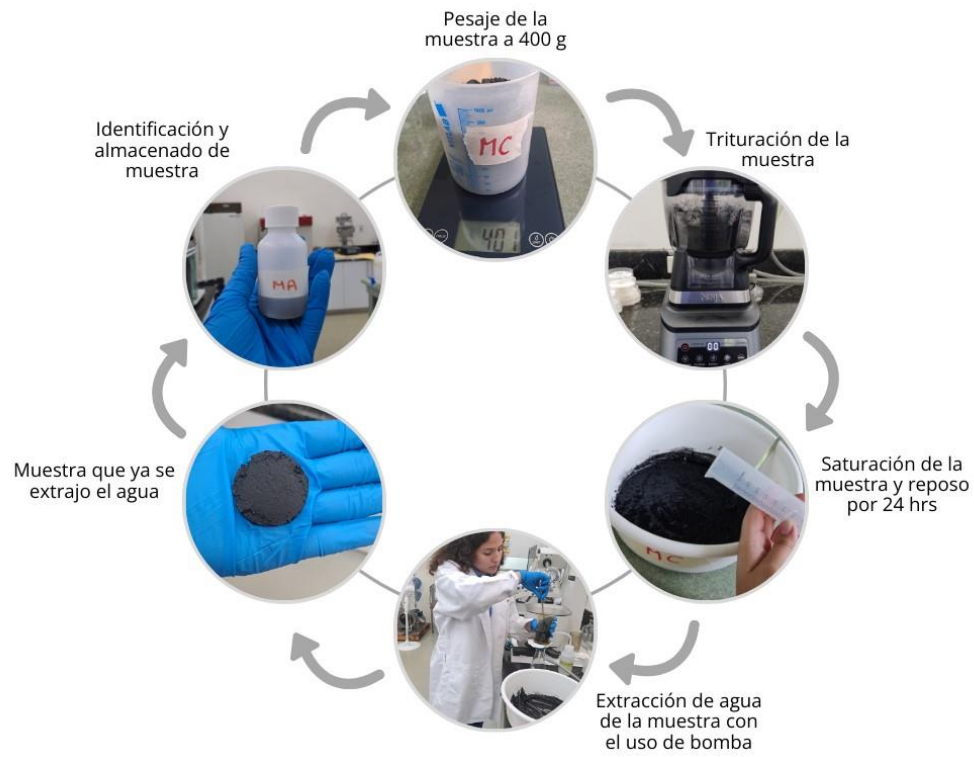
Anexo K*Elaboración de biochar por pirólisis lenta*

Anexo L*Preparación de la muestra de biochar*

Anexo M

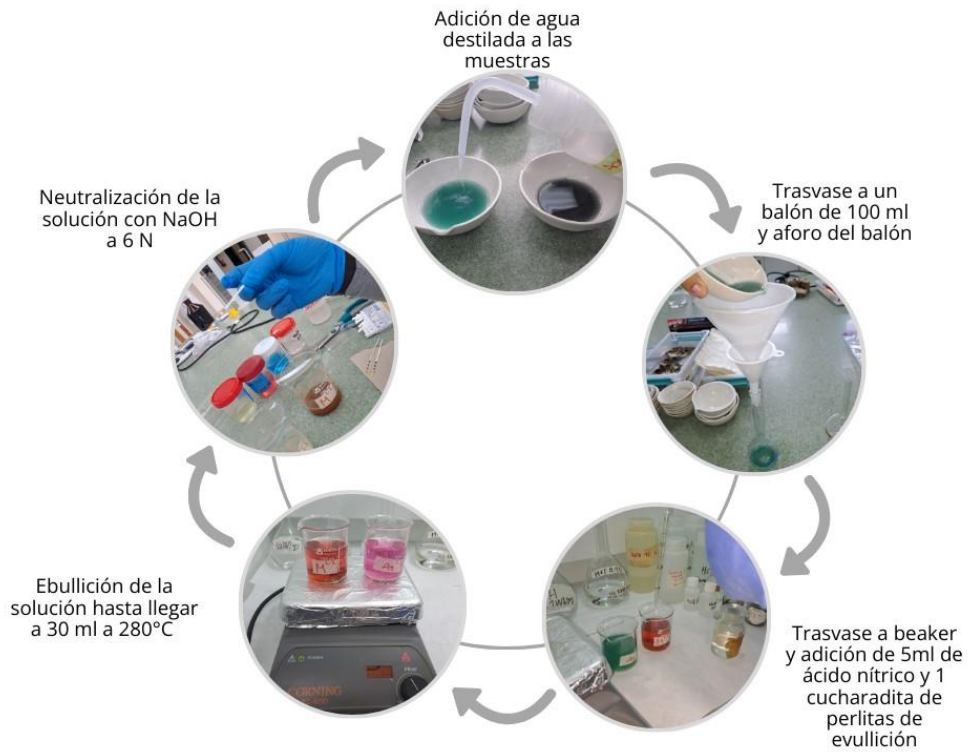
Resultados muestra de biochar a 105°C, 600°C y 900°C



Anexo N*Flujo de proceso del método de extracción por medio de pasta saturada*

Anexo O

Flujo de proceso de extracción de minerales por el método de digestión con ácido nítrico



Anexo P*Caracterización de biomasa lignocelulósica de los componentes de la planta de banano*

Residuo	Celulosa (%)	Lignina (%)	Hemicelulosa (%)
Vástago (Pseudotallo)	31.26 – 69.00	5.00 - 18.6	18.00
Hojas	36.30	8.50	27.39
Raquis (Pinzote)	30.60	9.85	15.7
Cáscaras	56.55	12.68	29.39
Pseudopeciolo	36.98	12.68	32.84

Nota. Florez-Vargas et al. (2020).

Anexo Q

Datos sobre el peso de cada sección de la planta de banano y finca a la que pertenece

Nombre de Finca	Número de Parcela	Sección	Número de cable vía	Número de plantas	Plantas que deberían de haber	Número de hojas	Peso hojas (lb)	Peso promedio por hoja (lb)	Pseudotallo (lb)	Banano (lb)	Pinzote total (lb)	Pinzote desechado en empacadora (lb)	Plantas en cosecha
ACARSA	1	F20	11	125	132	8	27.75	3.47	113.00	54.75	7.00	4.50	4
ACARSA	2	F23-24	21	123	132	6	17.25	2.88	105.50	58.00	7.75	5.75	4
ACARSA	3	E28	33	131	132	9	9.50	1.06	133.25	71.00	8.00	6.50	1
Palo Verde A	1	D18	27	131	132	9	23.25	2.58	170.35	82.10	13.00	10.50	2
Palo Verde A	2	E14	20	131	132	8	28.25	3.53	161.00	79.90	13.50	10.25	1
Palo Verde A	3	11	11	137	132	11	42.00	3.82	132.50	64.00	8.75	6.50	1
Palo Verde B	1	G7	11	138	138	8	26.25	3.28	102.25	77.00	8.50	7.00	1
Palo Verde B	2			137	138	9	34.74	3.86	117.75	57.00	7.25	5.00	2
Cayo	1	L2	168	147	147	11	49.25	4.48	163.00	94.50	13.00	9.75	2
Cayo	2	L6	165	141	147	10	35.75	3.58	139.50	85.75	11.25	8.00	1
Naranja A	1	B24	5	131	132	9	31.25	3.47	150.25	69.25	8.00	6.75	3
Promedio						8		3.27	135.31	72.11	9.63	7.32	2

Anexo R*Registro de producción de biochar por lote*

Lote	Pinzote seco (lb)	Leña Utilizada (lb)	Peso del Biochar Producido (lb)	Tiempo de Producción (minutos)
1	4.53	5.03	1.54	15
2	6.62	6.60	3.37	21
3	8.35	8.43	3.14	22