

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**EFFECTO DEL BIOCARBÓN OBTENIDO A PARTIR DE BIOMASA RESIDUAL
AGRÍCOLA EN LA INMOVILIZACIÓN DE CADMIO EN EL SUELO EN FASE DE
LABORATORIO**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

CHRISTYE MARJORIE SILVA GUERRERO

Asesor

Ing. M.Sc. VICTOR MANUEL BETETA ALVARADO

Tingo María – Perú

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



EFECTO DEL BIOCARBÓN OBTENIDO A PARTIR DE BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA EN LA INMOVILIZACIÓN DE CADMIO EN EL SUELO EN FASE DE LABORATORIO

Autor : SILVA GUERRERO, Christye Marjorie.

Asesor : Ing. M.Sc. BETETA ALVARADO, Victor Manuel.

Línea de investigación : Ciencias y tecnologías ambientales.

Programa de investigación : Tecnologías para reducir la contaminación.

Eje tematico de investigación: Reducción de la contaminación de suelo.

Lugar de ejecución : Laboratorio de tratamiento de la contaminación del suelo UNAS -TM

Duracion : 8 meses

Financiamiento : Propio: S/ 3 916.69

Tingo María – Perú

2021



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 036-2021-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 02 de setiembre de 2021, a horas 10:05 a.m. en la Sala virtual Microsof Teams de del Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental para calificar la Tesis titulada:

“EFECTO DEL BIOCARBÓN OBTENIDO A PARTIR DE BIOMASA RESIDUAL AGRÍCOLA EN LA INMOVILIZACIÓN DE CADMIO EN EL SUELO EN FASE DE LABORATORIO”

Presentado por el Bachiller: **SILVA GUERRERO, Christye Marjorie**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADA** con el calificativo de **“MUY BUENO”**

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

Tingo María, 11 de Noviembre de 2021

Dr. LUIS EDUARDO ORE CIERTO
PRESIDENTE

Ing. JAIME TORRES GARCIA
MIEMBRO

Ing. M. Sc. JOSE DOLORES LEVANO CRISOSTOMO
MIEMBRO

Ing. M. Sc. VICTOR MANUEL BETETA ALVARADO
ASESOR

DEDICATORIA

A Dios, sobre todas las cosas, por bendecirme y hacer posible este momento tan importante en mi formación profesional.

A mi madre Janette Guerrero Rengifo y a mi padre Carlos Silva Rios, con infinito amor y gratitud, por ser los pilares mas importantes y demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional en el logro de mis objetivos.

A mi abuelos Ernesto Tarazona Jauregui y quien en vida fue Aurora Rengifo Rodriguez por sus sabios consejos, por enseñarme a luchar cada día y no rendirme ante ningun obstáculo.

A mis tias Rosa, Miriam, Cecilia, Andres, Isabel y Juan por todo el apoyo moral y por haber fomentado en mí, el deseo de superación, perseverencia y el anhelo de triunfo en la vida.

A mi primos Kiara, Raul y demás amigos que confiaron en mí e hicieron posible mi desarrollo profesional, a ellos con todo el amor y cariño.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, en especial a la Facultad de Recursos Naturales Renovables y a los docentes de carrera profesional de Ingeniería Ambiental que contribuyeron en mi formación académica universitaria.

Al M. Sc. Victor Manuel Beteta Alvarado, por el asesoramiento de este trabajo, por la brillante orientación ofrecida, por la amistad y por los valiosos consejos.

Al Dr. Luis Eduardo Ore Cierro presidente del jurado de tesis, al M. Sc. Jose Dolores Levano Crisostomo y al Ing. Jaime Torres Garcia, miembros del jurado de tesis, por su oportuna orientación y crítica en la realización del trabajo de investigación.

A los técnicos del Laboratorio Central de Investigación, Laboratorio de Suelos y Laboratorio de Fitoquímica que a través de sus experiencias en métodos analíticos, aportaron de forma oportuna en esta investigación.

Al Bach. Paul Anderson Palacios Arica por su apoyo y dedicación en la fase de producción del biocarbón.

Finalmente extendiendo mis agradecimientos a todas las personas que directa e indirectamente estuvieron involucradas en esta investigación y que me permitieron cumplir esta meta.

ÍNDICE

| | Página |
|--|--------|
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 3 |
| 2.1. Antecedentes..... | 3 |
| 2.1.1. Antecedentes internacionales..... | 3 |
| 2.1.2. Antecedentes nacionales | 3 |
| 2.2. Cadmio..... | 4 |
| 2.2.1. Origen del cadmio..... | 5 |
| 2.2.2. Acumulación de cadmio en las plantas..... | 5 |
| 2.2.3. Ingreso del cadmio en la cadena trófica..... | 6 |
| 2.2.4. Cadmio en el suelo..... | 6 |
| 2.2.5. Disponibilidad del cadmio en el suelo | 7 |
| 2.2.6. Efectos del cadmio en la salud humana | 7 |
| 2.3. Pirólisis | 7 |
| 2.3.1. Tipos de pirólisis..... | 8 |
| 2.3.2. Etapas de la pirólisis | 9 |
| 2.4. Biocarbón..... | 9 |
| 2.4.1. Fuentes de producción de biocarbón | 9 |
| 2.4.2. Composición del biocarbón | 10 |
| 2.4.3. Propiedades fisicoquímicas del biocarbón..... | 10 |
| 2.4.4. Efecto del biocarbón en el suelo | 11 |
| 2.5. Bioamasa residual agrícola | 12 |
| 2.5.1. Bioamasa residual de <i>Theobroma cacao</i> L. (cacao)..... | 12 |
| 2.5.2. Bioamasa residual de <i>Coffea arabica</i> (café)..... | 13 |
| 2.5.3. Bioamsa resiudal de <i>Oryza sativa</i> (arroz)..... | 13 |
| III. MATERIALES Y MÉTODOS | 14 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.1. | Lugar de ejecución..... | 14 |
| 3.2. | Aspectos ambientales..... | 14 |
| 3.2.1. | Ecología | 14 |
| 3.2.2. | Temperatura | 15 |
| 3.2.3. | Precipitación | 15 |
| 3.2.4. | Humedad | 15 |
| 3.3. | Materiales | 15 |
| 3.3.1. | Materiales..... | 15 |
| 3.3.2. | Equipos | 16 |
| 3.4. | Metodología..... | 16 |
| 3.4.1. | Fase I: Producción de biocarbón..... | 17 |
| 3.4.2. | Fase II: Tratamiento del suelo con biocarbón..... | 21 |
| 3.5. | Método de la investigación | 24 |
| 3.5.1. | Tipo y diseño de la investigación | 24 |
| 3.5.2. | Variables en estudio..... | 25 |
| 3.5.3. | Componentes en estudio | 25 |
| 3.5.4. | Diseño experimental | 25 |
| 3.5.5. | Análisis estadístico | 27 |
| IV. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 28 |
| 4.1. | Producción y caracterización del biocarbón obtenido a partir de biomasa residual agrícola | 28 |
| 4.1.1. | Rendimiento de la producción de Biocarbón..... | 28 |
| 4.1.2. | Análisis proximal..... | 29 |
| 4.1.3. | Análisis de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón..... | 30 |
| 4.1.4. | Análisis de la composición elemental del biocarbón..... | 31 |
| 4.1.5. | Análisis de microfotografía electrónica del biocarbón | 32 |
| 4.2. | Efecto del biocarbón en el desarrollo de las plantas de <i>Theobroma cacao</i> L. | 34 |
| 4.2.1. | Altura de las plantas..... | 34 |

| | |
|---|----|
| 4.2.2. Número de hojas por planta | 35 |
| 4.2.3. Diámetro del tallo | 37 |
| 4.2.4. Longitud radicular..... | 39 |
| 4.2.5. Peso fresco por planta..... | 40 |
| 4.2.6. Peso seco por planta..... | 42 |
| 4.3. Efecto del biocarbón sobre los niveles de cadmio en la planta de <i>Theobroma cacao</i> | 43 |
| 4.4. Eficiencia de inmovilización de cadmio en el suelo..... | 46 |
| V. CONCLUSIONES | 49 |
| VI. PROPUESTA A FUTURO | 50 |
| VII. REFERENCIAS | 51 |
| ANEXOS..... | 58 |

ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla | Página |
|--|--------|
| 1. Propiedades fisicoquímicas del cadmio. | 4 |
| 2. Métodos empleados en el análisis fisicoquímico del biocarbón. | 20 |
| 3. Profundidad del muestreo de suelo. | 21 |
| 4. Métodos empleados para el análisis fisicoquímico del suelo..... | 22 |
| 5. Unidades experimentales del estudio. | 26 |
| 6. Análisis proximal de los diferentes tipos de biocarbón..... | 29 |
| 7. Propiedades fisicoquímicas de los tipos de biocarbón. | 30 |
| 8. ANVA para la altura en plantas de <i>T. cacao</i> sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón. | 34 |
| 9. ANVA para el número de hojas en plantas de <i>T. cacao</i> sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón..... | 36 |
| 10. Efecto simple para la cantidad de hojas en <i>T. cacao</i> sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón. | 37 |
| 11. ANVA para el diámetro del tallo en <i>T. cacao</i> sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón. | 38 |
| 12. ANVA para la longitud radicular en <i>Theobroma cacao</i> L. sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón. | 39 |
| 13. ANVA para el peso fresco en <i>T. cacao</i> sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón..... | 41 |
| 14. ANVA para el peso seco en <i>T. cacao</i> sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón..... | 42 |
| 15. ANVA para los niveles de cadmio en <i>T. cacao</i> sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón. | 44 |
| 16. Efecto simple para el nivel de cadmio en <i>T. cacao</i> sometidas al tipo de biomasa y proporción de biocarbón. | 45 |
| 17. ANVA para la eficiencia de inmovilización de cadmio en suelos sometidos al tipo de biomasa y proporción de biocarbón. | 46 |

| | | |
|-----|---|----|
| 18. | Efecto simple para la eficiencia de inmovilización de cadmio en suelos sometidos al tipo de biomasa y proporción de biocarbón. | 47 |
| 19. | Rendimientos en la producción del biocarbón. | 59 |
| 20. | Descriptivos para la altura de <i>T. cacao</i> sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón. | 59 |
| 21. | Descriptivos para la cantidad de hojas en <i>T. cacao</i> | 60 |
| 22. | Descriptivos para el diámetro del tallo en <i>T. cacao</i> | 60 |
| 23. | Descriptivos para la longitud radicular en <i>T. cacao</i> | 61 |
| 24. | Descriptivos para el peso fresco en <i>T. cacao</i> | 61 |
| 25. | Descriptivos para el peso seco en <i>T. cacao</i> | 62 |
| 26. | Descriptivos para los niveles de cadmio en plantas de <i>T. cacao</i> | 62 |
| 27. | Descriptivos para la eficiencia de inmovilización de cadmio en suelos. | 63 |
| 28. | Matriz de datos del cadmio disponible y eficiencia de absorción. | 64 |
| 29. | Matriz de datos de la características de las plantas de <i>Theobroma cacao</i> | 67 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | Página |
|--|--------|
| 1. Transporte del cadmio en el suelo..... | 6 |
| 2. Representación del proceso de pirólisis. | 8 |
| 3. Modelo básico de una partícula compleja de biocarbón en el suelo. | 12 |
| 4. Ubicación política de la ciudad de Tingo María. | 14 |
| 5. Diagrama de las fases de metodología. | 16 |
| 6. Horno pirolítico para la producción de biocarbón..... | 18 |
| 7. Esquema de distribución de las unidades experimentales al azar. | 26 |
| 8. Rendimientos en la producción del biocarbón. | 28 |
| 9. Composición elemental de los diferentes tipos de biocarbón. | 31 |
| 10. Microfotografía de MEB del bicoarbón de la cáscara del <i>T. cacao</i> | 32 |
| 11. Microfotografía de MEB del biocarbón de la cáscara del <i>C. arabica</i> | 33 |
| 12. Microfotografía de MEB del bicoarbón de la cascarilla del <i>O. sativa</i> | 33 |
| 13. Efecto principal del tipo de biomasa, concentración de biocarbón y el contraste con el testigo para la altura en plantas de <i>T. cacao</i> | 35 |
| 14. Efecto principal de los factores en estudio y el contraste con el testigo del número de hojas en plantas de <i>T. cacao</i> | 36 |
| 15. Efecto principal de los factores en estudio y el contraste con el testigo para el diámetro del tallo en <i>T. cacao</i> | 38 |
| 16. Efecto principal de los factores estudiados y el contraste con el testigo para la longitud radicular en <i>T. cacao</i> | 40 |
| 17. Efecto principal de los factores en estudio y el contraste con el testigo para el peso fresco de <i>T. cacao</i> | 41 |
| 18. Efecto principal de los factores estudiados y el contraste con el testigo para el peso seco en <i>T. cacao</i> | 43 |

| | | |
|-----|--|----|
| 19. | Efecto principal de los factores estudiados y el contraste con el testigo para el contenido de cadmio en <i>T. cacao</i> | 44 |
| 20. | Efecto principal de los factores estudiados y el contraste con el testigo para la eficiencia de inmovilización de cadmio en el suelo. | 47 |
| 21. | Análisis de suelos. | 70 |
| 22. | Contenido de cadmio en muestra de suelo y granos de cacao..... | 71 |
| 23. | Análisis con microfotografías electrónicas en muestras de biocarbón de cascarilla de arroz y café. | 72 |
| 24. | Análisis con microfotografías electrónicas en muestra de biocarbón en cascarillas de cacao. | 73 |
| 25. | Análisis elemental en muestra de biocarbón de cascarillas de arroz..... | 74 |
| 26. | Análisis elemental en muestra de biocarbón de cascarillas de café. | 75 |
| 27. | Análisis elemental en muestra de biocarbón de cascarillas de cacao..... | 76 |
| 28. | Análisis de reconstrucción 3D del biocarbón cascarilla de arroz..... | 77 |
| 29. | Análisis de reconstrucción 3D del biocarbón cascarilla de café. | 78 |
| 30. | Análisis de reconstrucción 3D del biocarbón cascarilla de cacao..... | 79 |
| 31. | Contenido de cadmio total (mg/kg) en plantulas de cacao desde el tratamiento T ₀ – T ₃ | 80 |
| 32. | Contenido de cadmio total (mg/kg) en plantulas de cacao desde el tratamiento T ₄ – T ₇ | 81 |
| 33. | Contenido de cadmio disponible (mg/kg) en muestras de suelo desde el tratamiento T ₈ – T ₉ | 82 |
| 34. | Contenido de cadmio disponible (mg/kg) en muestras de suelo desde el tratamiento T ₀ – T ₃ | 83 |
| 35. | Contenido de cadmio disponible (mg/kg) en muestras de suelo desde el tratamiento T ₄ – T ₇ | 84 |
| 36. | Contenido de cadmio disponible (mg/kg) en muestras de suelo desde el tratamiento T ₈ – T ₉ | 85 |

| | | |
|-----|---|----|
| 37. | Horno pirolítico elaborado para la producción del biocarbón..... | 86 |
| 38. | Acodicionamiento con leña y ramas al interior del horno pirolítico..... | 86 |
| 39. | Colocación de la cascarilla del <i>C, arabica</i> en la cámara interna de horno pirolítico..... | 87 |
| 40. | Inicio de la llama al interior de horno pirolítico utilizado en el estudio..... | 87 |
| 41. | Cierre del horno pirolítico e inicio de la pirólisis lenta..... | 88 |
| 42. | Medición de la temperatura durante el proceso de pirólisis..... | 88 |
| 43. | Biocarbón resultante del proceso de pirólisis por un tiempo de 12 horas..... | 89 |
| 44. | Biocarbón obtenido a partir de la biomasa de la mazorca de cacao..... | 89 |
| 45. | Biocarbón obtenido a partir de la biomasa de la cascarilla de <i>O, sativa</i> | 90 |
| 46. | Biocarbón obtenido a partir de la biomasa de la cascarilla de <i>C, arabica</i> | 90 |
| 47. | Biocarbón obtenido a partir de la biomasa residual molido para la aplicación al suelo..... | 91 |
| 48. | Análisis del biocarbón producido a partir de la biomasa residual agrícola..... | 91 |
| 49. | Determinación del contenido de humedad en muestras de biocarbón..... | 92 |
| 50. | Muestras de biocarbón en el mufla para determinación del porcentaje de ceniza..... | 92 |
| 51. | Determinación del pH de los diferentes tipos de biocarbón..... | 93 |
| 52. | Muestreo de suelo en el Sector Picuruyacu – Castillo Grande..... | 93 |
| 53. | Pregerminado de las semillas de <i>Theobroma cacao</i> L, "cacao"..... | 94 |
| 54. | Preparación de la mezcla biocarbón-suelo en porcentaje de 6%, 8% y 10%..... | 94 |
| 55. | Colocación de las semillas de <i>Theobroma cacao</i> L, en los maceteros de polietileno..... | 95 |
| 56. | Plantas de <i>Theobroma cacao</i> L, a un mes después de la germinación..... | 95 |
| 57. | Plantas de <i>Theobroma cacao</i> L, a los dos meses después de la germinación..... | 96 |
| 58. | Medición del diámetro de tallo en las plantas de <i>Theobroma cacao</i> L..... | 96 |
| 59. | Medición de la altura en las plantas de <i>Theobroma cacao</i> L..... | 97 |

| | | |
|-----|---|----|
| 60. | Medicion de la longitud radicular en las plantas de <i>Theobroma cacao</i> L..... | 97 |
| 61. | Plantas de <i>Theobroma cacao</i> L, en la estufa para determinación de peso seco..... | 98 |
| 62. | Muestra de suelos para análisis de cadmio..... | 98 |
| 63. | Digestion por ácido nítrico-perclórico para determinación de niveles de cadmio total. | 99 |
| 64. | Aplicacion de extractante EDTA para determinación de cadmio disponible en suelo..... | 99 |

RESUMEN

El cadmio es un metal pesado muy tóxico que por su concentración y distribución puede perjudicar la producción agrícola principalmente en el cultivo de *Theobroma cacao L.* Una estrategia para reducir los niveles de Cd en el suelo es el uso del biocarbón, que es un sólido carbonáceo obtenidos bajo proceso de pirólisis. La investigación consistió en producir y caracterizar el biocarbón obtenido a partir de tres tipos de biomasa residual agrícola: cáscara de *Theobroma cacao L.*, cascarilla de *Oryza sativa* y cascarilla de *Coffea arabica*. Se prepararon bolsas tipo masetta con suelo agrícola mezclado con biocarbón en proporciones de 6%, 8%, 10% y se sembraron plantas de *Theobroma cacao*. El diseño experimental adaptado fue un DCA con arreglo factorial de 3x3 con 5 repeticiones más un tratamiento sin biocarbón como testigo. El biocarbón obtenido de la cascarilla de *C. arabica* y *O. sativa* presentó efectos significativos en el número de hojas, diámetro de tallo y peso fresco de las plantas. El biocarbón disminuyó el contenido de Cd en las plantas, con efectos significativos en la cascarilla de *T. cacao* en proporciones de 6%, 8% y 10%. La mayor eficiencia de inmovilización de cadmio en el suelo se observó en la combinación del biocarbón de la cascarilla de *O. sativa* en una dosis de 8.0% con una inmovilización de 88.22%. Se concluye que la aplicación de biocarbón fue efectiva en la inmovilización Cd en el suelo, de manera de poder reducir la biodisponibilidad en las plantas de *T. cacao*.

ABSTRACT

Cadmium is a highly toxic heavy metal that, due to its concentration and distribution, can harm agricultural production, mainly in the cultivation of *Theobroma cacao* L. obtained under the pyrolysis process. The research consisted of producing and characterizing the biochar obtained from three types of agricultural residual biomass: *Theobroma cacao* L. husk, *Oryza sativa* husk and *Coffea arabica* husk. Pot-type bags were prepared with agricultural soil mixed with biochar in proportions of 6%, 8%, 10% and *T. cacao* plants were sown. The adapted experimental design was a DCA with a factorial arrangement of 3x3 with 5 repetitions plus a treatment without biochar as a control. The biochar obtained from the husks of *C. arabica* and *O. sativa* showed significant effects on the number of leaves, stem diameter and fresh weight of the plants. The biochar decreased the Cd content in the plants, with significant effects on the *T. cacao* husk in proportions of 6%, 8% and 10%. The highest efficiency of immobilization of cadmium in the soil is carried out in the combination of the biochar from the husk of *O. sativa* in a dose of 8.0% with an immobilization of 88.22%. It is concluded that the application of biochar was effective in immobilizing Cd in the soil, in order to reduce the bioavailability in *T. cacao* plants.

I. INTRODUCCIÓN

El cadmio es un metal pesado considerado como uno de los elementos más nocivos que pueden encontrarse en el suelo, ya sea de origen natural o antrópico, pero independientemente de ello, las plantas lo pueden absorber y acumular en sus distintas estructuras y proporciones. Además su incorporación a la cadena alimentaria, tiene en la actualidad mucha preocupación, debido a que este elemento puede alterar el metabolismo humano.

La presencia de metales pesados en altas concentraciones en los suelos pueden causar riesgos para los ecosistemas a largo plazo, asociados con la transferencia al medio ambiente. Una técnica que ha adquirido relevancia en la última década es la aplicación del biocarbón o biochar, que es un producto sólido de pirólisis diseñado para ser utilizado para la gestión ambiental. El biocarbón es característico por su capacidad de fijación de carbono, y su aplicación al suelo mejorará los parámetros físicos, químicos y biológicos. Otros estudios han demostrado que el biocarbón puede reducir la movilidad de los metales en el suelo y su absorción por las plantas.

El biocarbón se produce a partir de la transformación de distintos tipos de biomasa por ejemplo, astillas de madera, estiércol animal y residuos de cultivos; consiguiendo reducir significativamente el volumen y el peso de los materiales de origen. La materia prima usada para la producción del biocarbón tiene distinta capacidad de inmovilización de contaminantes en el suelo y las propiedades deseadas se encontrarán en función a su selección.

Uno de los problemas más graves en la provincia de Leoncio Prado es la presencia de cadmio en los suelos, con niveles que van de 0,8 a 10,6 ppm de Cd total en el suelo, que por su concentración y distribución puede perjudicar la producción agrícola principalmente en el cultivo de cacao. Por ello es necesario aplicar estrategias de remediación diseñadas para reducir su biodisponibilidad. Una opción a considerar es la aplicación del biocarbón, que se puede producir a partir de diferentes residuos biomásicos agrícolas de gran cantidad y volumen en la región.

Bajo este contexto se plantea la siguiente interrogante: ¿En qué medida el biocarbón obtenido a partir de biomasa residual agrícola afecta los niveles de inmovilización de cadmio en el suelo en fase de laboratorio?, planteándose la hipótesis: el biocarbón obtenido a partir de biomasa residual agrícola presenta propiedades que inmovilizan el cadmio presente en el suelo en un porcentaje superior al 50%.

Objetivos

Objetivo general

- Determinar el efecto del biocarbón obtenido a partir de biomasa residual agrícola en la inmovilización de cadmio en el suelo en fase de laboratorio.

Objetivos específicos

- Producir y caracterizar el biocarbón obtenido a partir de la biomasa residual de: mazorca de *Theobroma cacao* (cacao), cascarilla de *Coffea arabica* (café) y cascarilla de *Oryza sativa* (arroz).
- Evaluar el efecto del biocarbón en el desarrollo de las plantas de *Theobroma cacao* (cacao).
- Evaluar el efecto del biocarbón sobre los niveles de cadmio en la planta de *Theobroma cacao* (cacao).
- Determinar la eficiencia de inmovilización de cadmio en el suelo.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Al-Wabel et al. (2015) en su publicación “Conocarpus biocarbón as a soil amendment for reducing heavy metal availability and uptake by maize plants”, concluyeron que la aplicación de biocarbón producido a partir de restos de *Conocarpus*, tuvo un efecto significativo en la disminución de los niveles de la concentración de metales pesados en brotes de la planta de maíz, en respuesta al aumento de las tasas de aplicación con una disminución máxima del 51.3% y 60.5% para Mn, 28% y 21.2% para Zn. 60% y 29.5% para Cu, 53.2% y 47.2% para Cd; sugiriendo que, el biocarbón se puede usar eficazmente como enmienda del suelo para la inmovilización de metales pesados y para reducir la fitotoxicidad.

Li et al. (2016) en su publicación “Biochar amendment immobilizes lead in rice paddy soils and reduces its phytoavailability”, concluyeron que la enmienda con 5% biocarbón producido a partir de paja de *O. sativa* resultó con una disminución del 54 y 94% de Pb soluble en ácido y extraíble en CaCl_2 , respectivamente, al aplicarlo a un suelo con cultivo de arroz en etapa de madurez. La aplicación del biocarbón al suelo produjo una disminución en la disponibilidad de Pb, además en muestras de las raíces del *O. Sativa* con aplicación de biocarbón, se encontraron Pb-pectina y Pb-cisteína que son complejos orgánicos que impiden la translocación de Pb de la raíz al brote, reduciendo la acumulación de Pb en el *O. sativa*.

Diaz (2017) en su publicación “Remediación de suelos alterados por actividad de minería del carbón a cielo abierto, mediante aplicación de biocarbón procedente de residuos biomásicos de la palma de aceite en la zona carbonífera del departamento del Cesar”, indica que la aplicación de biocarbón producido con residuos biomásicos del cultivo de *Elaeis guineensis* “palma de aceite”, guarda relación con el crecimiento de la planta de manera favorable. Los tratamientos en combinación de biocarbón, micorrizas y NPK, en mayoría aumentaron la biomasa radicular. El estudio concluyó que la adición de biocarbón en un suelo minero reduce el alto contenido de metales fitotóxicos (Cu, Zn, Al, Mn y Fe), además influyó en la germinación y elongación de las raíces de las semillas de pasto *Brachiaria decumbens*.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Condeña (2017) en su publicación “Recuperación de suelos contaminados con plomo mediante el uso de biocarbón de bagazo de caña de azúcar en el parque Chota del AA. HH.

Ramón Castilla – Callao 2017”, determinó las propiedades físico-químicas que presentó el biocarbón producido a partir de residuos biomásicos de bagazo de caña de azúcar describiendo niveles del pH de 8.7 y un porcentaje de lignina de 21.7%, parámetros que influyen en la adsorción de los metales pesados. El estudio concluyó que el biocarbón logró reducir significativamente el Pb en el suelo, alcanzando una eficiencia de 61.09% al aplicar 10% de biocarbón y 61.7% al aplicar 50% de biocarbón, después de un periodo de 45 días.

Romero (2017) en su publicación “Eficiencia de inmovilización de plomo en el suelo mediante la aplicación de cantidades de biocarbón en el distrito San Mateo – Lima” demostró que el biocarbón reduce la biodisponibilidad del Pb obteniendo una eficiencia máxima de inmovilización de 81.89% en el suelo y 77.38% en el agua intersticial, aplicando 20% de biocarbón producido a partir de excretas porcinas. Se utilizaron plantas de *Lactuca Sativa* como bioindicador, cuyas raíces no presentaron concentración de Pb en tratamientos con aplicación de biocarbón, a diferencia del testigo con una concentración de 0.7 mg/Kg de Pb absorbido. El estudio concluye que el biocarbón es una enmienda orgánica con la capacidad de adsorber y reducir la disponibilidad de Pb en el suelo y en el agua intersticial.

2.2. Cadmio

Rodríguez et al. (2008) menciona que el cadmio es un elemento no esencial, de poca abundancia en la corteza terrestre y a ciertas concentraciones es tóxico para los organismos vivos. El cadmio no se encuentra en el ambiente como un metal puro, es más abundante en forma de óxidos complejos, sulfuros y carbonatos de zinc, plomo y menas de cobre. No desempeña una función biológica esencial y es altamente tóxico para plantas, animales y seres humanos (Isaura, 2011).

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del cadmio.

| Cadmio | |
|---------------------|-----------------------------|
| Símbolo químico | Cd ²⁺ |
| Características | Maleable, dúctil y flexible |
| Punto de fusión | 321 °C |
| Punto de ebullición | 756 °C |
| Número atómico | 48 |
| Peso atómico | 112,41 |
| Densidad | 8,64 gcm ⁻³ |

Fuente: García (2002).

2.2.1. Origen del cadmio

El cadmio puede originarse de forma natural o antropogénica. En la corteza terrestre se encuentra ampliamente distribuido en una concentración media de 0.1 mg/Kg (Osorio et al., 1997). Las fuentes naturales involucran a las rocas sedimentarias e ígneas, depósitos arcillosos y rocas metamórficas en concentraciones que no exceden 0,3 mg/kg y en minerales de zinc, plomo y cobre en concentraciones considerablemente más bajas. Sin embargo, la actividad volcánica posee la mayor fuente natural de liberación de cadmio a la atmósfera.

El cadmio se libera al ambiente como resultado de las actividades industriales (Farkas et al., 2007) que involucran la fabricación de baterías y acumuladores, PVC, fusibles, soldadura, etc. Otras fuentes antropogénicas son las actividades mineras de metales no ferrosos, la producción y uso de fertilizantes fosfatados, la generación de polvos por el proceso de fabricación de cemento y fertilizantes fosfatados, la utilización de pigmentos a base de cadmio para crear tintes, pinturas y cerámica.

2.2.2. Acumulación de cadmio en las plantas

El cadmio por ser un elemento no esencial no dispone de un mecanismo de entrada específico en las plantas. El mecanismo de ingreso a las es por la vía de la membrana plasmática de las células epidérmicas de la raíz, a través de los transportadores de metales esenciales Fe^{2+} , Zn^{2+} y Ca^{2+} por la vía del simplasto (Hernandez et al., 2019). Otro posible mecanismo es a través de la respiración con la disociación del CO_2 e intercambio de H^+ con el Cd^{2+} del suelo, que es absorbido por las células epidérmicas de la raíz.

El cadmio se acumula en la raíz, y es secuestrada por la vacuola de las células, puede pasar al xilema a través del apoplasto y/o a través del simplasto formando complejos (Clemens et al., 1998). Las especies vegetales no presentan los mecanismos para que pudieran excretar el metal pesado cadmio y, al ser absorbido por los mismos queda retenido en sus tejidos.

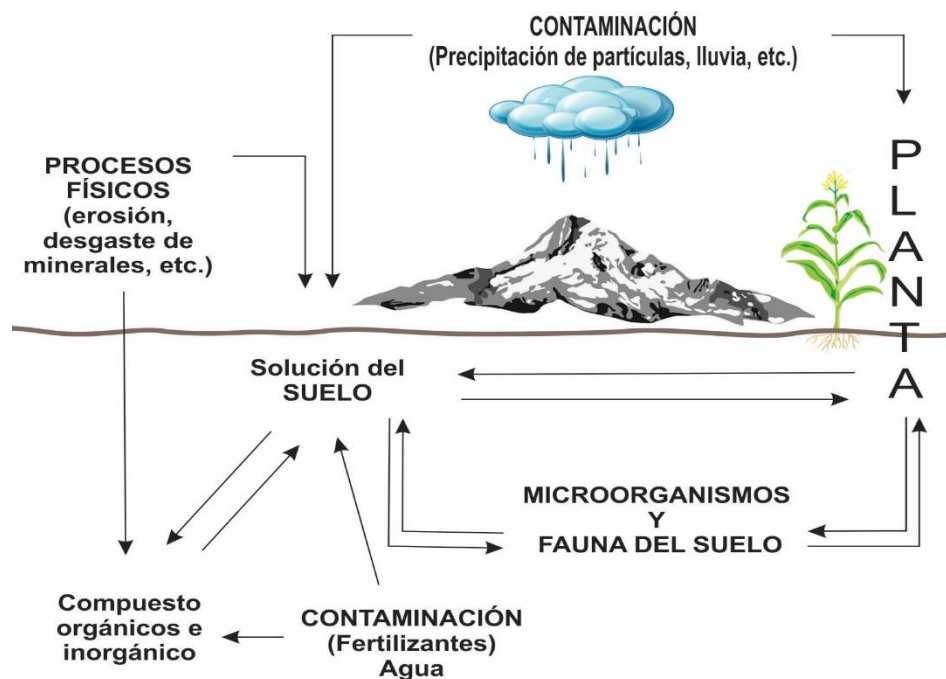
La acumulación de cadmio va a depender del tipo de cultivo, debido a que no todas las plantas lo acumulan en igual medida (Prince et al., 2002). En el caso del *Theobroma cacao* L. absorbe ligeramente el cadmio contenido en el suelo y lo acumula en las almendras (Barrueta, 2013), presentando alteraciones en los procesos vitales como: la fotosíntesis, la absorción de agua y de nutrientes.

2.2.3. Ingreso del cadmio en la cadena trófica

El riesgo de ingreso del cadmio a la cadena alimenticia ha generado mundialmente una preocupación debido al efecto tóxico que causa en plantas, animales y humanos. El grado de contaminación por cadmio depende del nivel en la cadena trófica, los microorganismos y el plancton acumulan menores concentraciones, pero en organismos superiores como depredadores o los humanos se produce la bioacumulación y la bioconcentración. La principal vía de ingreso del cadmio en el ser humano es la ingesta de vegetales contaminados con este metal (Norvell et al., 2000).

2.2.4. Cadmio en el suelo

La presencia del cadmio en los suelos pueden ser producto de la deposición atmosférica (23% del total), vertidos urbanos, uso de barros industriales como fertilizantes para mejorar las características minerales de los suelos, o uso de fertilizantes como derivados de fosfato impuros y excremento de animales (Madeddu, 2005). Mayormente las concentraciones de este elemento son inferiores a 1 mg/kg en suelos y se mantienen en un promedio entre 0.01 a 0.5 mg/kg.



Fuente: Badillo (2008).

Figura 1. Transporte del cadmio en el suelo.

El contenido de cadmio en los suelos va a presentar variaciones debido a la composición de la roca madre, al suministro de metales que provienen de fertilizantes,

abonos, agroquímicos y la contaminación atmosférica. El cadmio se transporta al suelo con facilidad a través de procesos físicos: erosión, desgaste de minerales, precipitación de partículas, etc., lo que lo hace disponible para las plantas, como se muestra en la Figura 1.

2.2.5. Disponibilidad del cadmio en el suelo

La disponibilidad del cadmio es generalmente alta en el suelo, a comparación con otros metales, y esta relacionada con la movilidad, transporte y distribución del metal en este sistema. La disponibilidad del cadmio está determinada por la concentración en la solución del suelo y la capacidad para liberar estos iones desde la fase sólida a la solución, donde es absorbido por la planta, como consecuencia de su solubilidad y el predominio de uniones de baja energía con la fase sólida del suelo. El cadmio se encuentra muy fuertemente adherido a los minerales de arcilla, óxidos de hierro y aluminio y materia orgánica (Subero, 2013).

2.2.6. Efectos del cadmio en la salud humana

El cadmio al ser absorbido es transportado por la sangre y distribuido en el organismo. Los seres humanos están expuestos al cadmio principalmente por la ingestión de alimentos y bebidas contaminadas con cadmio (hojas de vegetales, granos, cereales, frutas, vísceras animales y pescado) causando trastornos agudos en el tracto gastrointestinal cuyos síntomas incluyen náuseas, salivales, vómito, dolor abdominal tipo cólico y dolor de cabeza; en casos más severos se pueden presentar diarrea y shock (Madeddu, 2005).

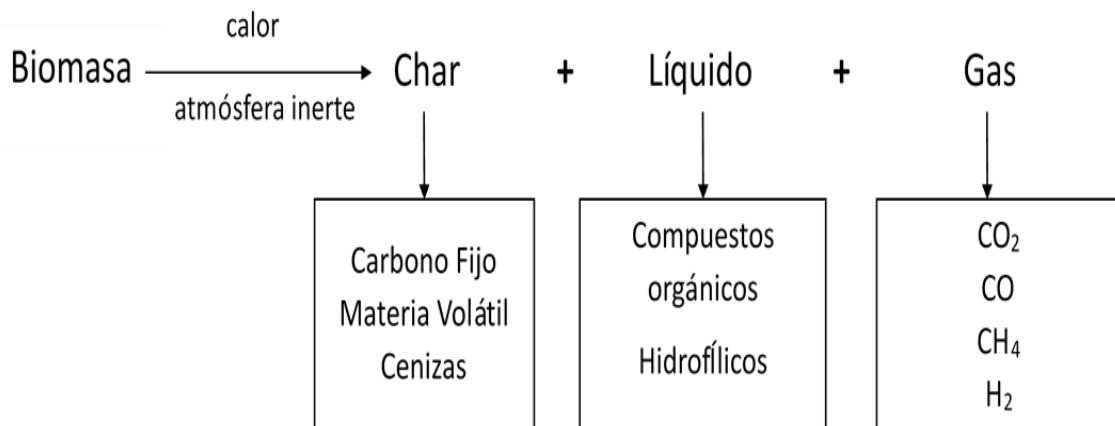
Otra vía de ingreso es a través de la inhalación de partículas de cadmio, cuyos síntomas son dolor de cabeza, irritación del tracto respiratorio, reseca nasal y de la tráquea, tos, disnea, escalofríos, debilidad general, respiración agitada, fiebre y en casos más severos, insuficiencia respiratoria con shock y al final, la muerte. El cadmio produce neumonitis química y, en algunas ocasiones, edema pulmonar (Madeddu, 2005). El pulmón es un órgano muy susceptible a la exposición a cadmio, la inhalación crónica subaguda, puede producir bronquitis con daño progresivo alveolar, fibrosis secundaria y enfisema (Isaura, 2011; Nava y Méndez, 2011).

2.3. Pirólisis

La pirólisis es un proceso de descomposición termoquímica que convierte la biomasa en un sólido rico en carbono y materia volátil, a través del calentamiento a temperaturas

moderadamente altas y en condiciones de bajo contenido o en ausencia de oxígeno (Brownsort, 2009).

Según Menéndez (2012), citado por De La Cruz (2018), es el calentamiento de materiales orgánicos en ausencia de aire a temperaturas que llegan hasta 500°C, en el cual la materia se transforma en un sólido rico en carbono, denominado biocarbón, además de obtener gases y líquidos, como agua (H₂O), metano (CH₄) monóxido de carbono (CO) dióxido de carbono (CO₂) y entre otros, como se indica en la Figura 2.



Fuente: Brownsort (2009).

Figura 2. Representación del proceso de pirólisis.

2.3.1. Tipos de pirólisis

Según Guerra (2015), el proceso de pirólisis se clasifica considerando la velocidad de calentamiento: pirólisis lenta y pirólisis rápida.

La pirólisis lenta es el tipo de tecnología más utilizado; tiene lugar al trabajar con velocidades lentas de calentamiento, con temperaturas de producción inferiores a las de la pirólisis rápida, típicamente a 400°C y con largos tiempos de residencia (Brownsort, 2009). En la pirólisis lenta el enfoque es la producción del biochar o biocarbón, transformando aproximadamente un 40% de la biomasa original, acompañado por la generación de productos líquidos y gaseosos en menores proporciones.

La pirólisis rápida está típicamente reservada para la producción de energía; se caracteriza por velocidades de calentamiento elevadas y por bajos tiempos de residencia de vapor (Brownsort, 2009). La temperatura de producción se encuentra a partir de los 500 °C y el proceso está diseñado para dar un alto rendimiento de bio-aceite o bio-oil en aproximadamente un 65%, en comparación con la producción de biocarbón en un 15% de la biomasa original.

2.3.2. Etapas de la pirólisis

Según San Miguel y Guitierrez (2015), describe las etapas de la pirólisis considerando los rangos de temperatura:

- Etapa de secado ($T < 200$ °C), la biomasa se calienta a bajas temperaturas, se libera la humedad superficial, evaporándose el agua y los extractos ligeros presentes.
- Etapa de deshidratación ($T = 200-300$ °C), ocurre la deshidratación exotérmica de los polisacáridos estructurales (celulosa y hemicelulosa) con la liberación de agua y gases de bajo peso molecular (CO_2 , CO, agua, H_2 , N_2 , C_2H_4 , etc.).
- Etapa pirolítica ($T = 250 - 600$ °C), descomposición térmica de los polímeros de la biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina), gases condensables y no condensables, y se forman compuestos orgánicos volátiles y gases permanentes.
- Etapa de carbonización ($T = 400 - 800$ °C), se forman compuestos de mayor peso molecular (material carbonizado), formando el biocarbón.

2.4. Biocarbón

El biocarbón es un carbón estable y altamente poroso producido por medio de la descomposición térmica de la biomasa, bajo un sistema de suministro limitado de oxígeno (O_2) y ante temperaturas medias (< 700 °C) (Lehmann y Joseph, 2009).

El biocarbón o biochar es un carbón enriquecido, que se produce cuando la biomasa es quemada en un reactor cerrado con aire limitado (oxígeno) durante la combustión, por medio de un proceso denominado pirólisis (Lehmann et al., 2006; Manya, 2012), que al aplicar al suelo mejora las propiedades físico-químicas y los rendimientos de diversos cultivos.

Escalante et al. (2016) describe que el biocarbón es un sólido poroso carbonáceo, producto de la descomposición de la materia orgánica en reducido oxígeno (pirólisis), donde la materia biomásica atraviesa un proceso de conversión termoquímica a temperaturas entre 300 a 700 °C, con propiedades fisicoquímicas que favorecen el almacenamiento de carbono a largo plazo en el ambiente.

2.4.1. Fuentes de producción de biocarbón

La materia prima usada para elaborar el biocarbón define sus características estructurales y químicas, y da como resultado materiales heterogéneos (Antal y Gronli, 2003).

Existen muchos tipos de residuos para la producción de biocarbón, entre estos destacan los residuos de cosecha, plantas secas, biomasa de árboles, desechos de papel, de arroz, los residuos de aceituna, desperdicios orgánicos de la vida urbana; y Lehmann y Joseph (2009) describen como materias primas: madera, estiércol, hojas, residuos de cultivos.

2.4.2. Composición del biocarbón

La composición del biocarbón difiere con respecto al tipo de materia prima utilizado en su producción y las reacciones químicas que se desarrollan en el proceso de pirólisis. Montoya (2014) menciona que el biocarbón producido a partir de residuos de plantas o animales; esta constituido por celulosa, hemicelulosa, lignina, componentes orgánicos, agua y cenizas, siendo la celulosa el principal componente.

El biocarbón es compuesto principalmente por carbono orgánico recalcitrante y de macro y micronutrientes. Así mismo, esta compuesto por una concentración variada de otros elementos tales como oxígeno (O), hidrógeno (H), azufre (S), cationes básicos, metales pesados y de compuestos orgánicos. Los estudios determinaron que el biocarbón presenta niveles bajos de nitrógeno atribuido a la pérdida como amoníaco u óxidos de nitrógeno durante el proceso de carbonización (McLaughlin et al., 2009).

Además, los metales pesados pueden estar presentes en el biocarbón, causando efectos negativos en el rendimiento de los cultivos (Manya, 2012). La presencia de metales pesados y elementos traza puede concentrarse en el biocarbón debido a que son fácilmente absorbidos y translocados por las plantas usadas como material precursor.

2.4.3. Propiedades fisicoquímicas del biocarbón

2.4.3.1. El pH de la solución del biocarbón

El pH es una propiedad muy significativa debido a que es un determinante directo sobre los efectos de la relación suelo – biocarbón – planta. El pH del biocarbón estará en función del material precursor y de las condiciones operacionales es la que es obtenido (Lehmann y Joseph, 2009).

2.4.3.2. La conductividad eléctrica del biocarbón

La conductividad eléctrica esta relacionada con el contenido total de sales disueltas en el biocarbón, incluyendo todos los fertilizantes y sales neutras que se encuentran en la

solución. Generalmente un biocarbón con alta conductividad puede aumentar la salinidad del suelo generando impactos negativos en el crecimiento de las plantas.

2.4.3.3. La densidad aparente del biocarbón

La densidad aparente del biocarbón es baja debido a su naturaleza porosa con un amplio rango de tamaños de poros que produce una elevada área superficial. Se deduce que la aplicación del biocarbón puede reducir la densidad aparente del suelo, de manera que aumenta la porosidad y aireación causando un efecto deseable sobre las raíces y crecimiento de las plantas.

2.4.4. Efecto del biocarbón en el suelo

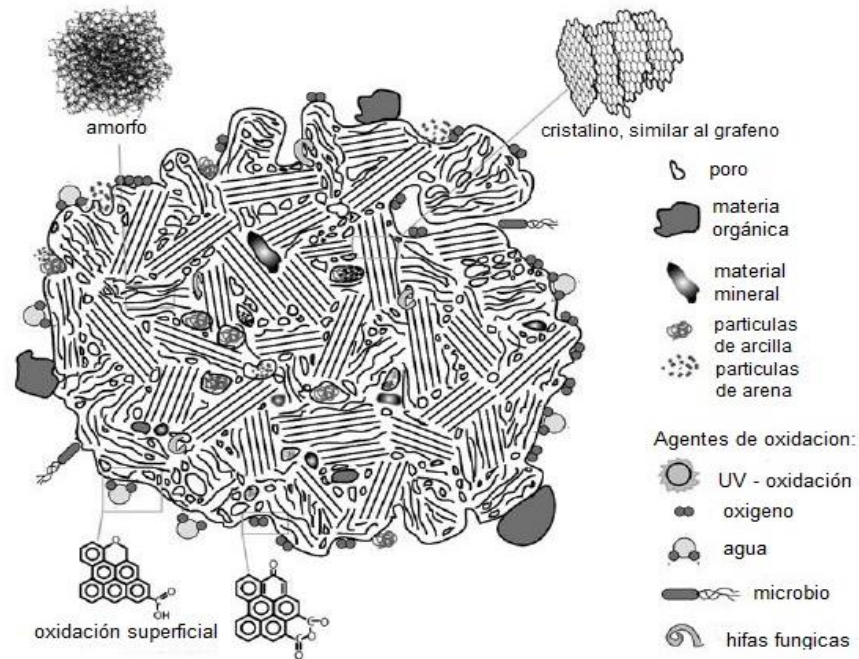
El uso del biocarbón como enmienda es de gran interés para mejorar la calidad del suelo (Glaser et al., 2000); con énfasis en suelos agotados o degradados, incrementando su capacidad de intercambio catiónico (CIC), el pH, la disponibilidad de nutrientes como P, Ca, y K (Liang et al., 2006). Además, se han realizados remediaciones en suelos contaminados con metales pesados Cu, Zn y Cd (Moreno et al., 2010) y se han realizados evaluaciones en la inmovilización y lixiviación de Cu, Ni, Pb y Cd aplicando biocarbón a partir de diferentes materias primas (Uchimiya et al., 2011).

La aplicación del biocarbón presenta diversos efectos positivos como mejorador de la estructura del suelo, retención y fijación de C a largo plazo; y además presenta la capacidad para adsorber compuestos metálicos, reduciendo la toxicidad de los mismos al controlar su movilidad (Beesley et al., 2011). Diversos estudios describen que el mecanismo de remediación de metales del biocarbón involucra el remplazo de iones preexistentes en su estructura por los iones metálicos del suelo (Bhatnagar et al., 2013).

Al aplicar el biocarbón al suelo por su estructura de poros finos permite la captura de diferentes compuestos físicamente dentro de los poros (Nguyen et al, 2004; Yu et al, 2006). En la Figura 3 se muestra un modelo básico de una partícula compleja de biochar en el suelo.

La presencia de sitios de intercambio en las superficies del biocarbón en gran medida influyen en la capacidad de retención de elementos y su baja biodisponibilidad (Fellet et al., 2014). De acuerdo a Sohi et al. (2010), la alta capacidad de sorción del biocarbón puede deberse a tres razones:

- (i) Interacciones electrostáticas entre cationes metálicos y superficie de carbono cargada negativamente.
- (ii) Intercambio iónico entre protones ionizables en la superficie del carbono ácido y cationes metálicos.
- (iii) Interacción de sorción que involucra electrones p deslocalizados de carbón.



Fuente: Lehmann y Joseph (2009).

Figura 3. Modelo básico de una partícula compleja de biocarbón en el suelo.

2.5. Bioamasa residual agrícola

La biomasa es la materia orgánica originada en un proceso biológico, usado como fuente de energía o como productos de transformación para múltiples fines. La biomasa residual de origen agrícola se define como todo el material vegetal generado en las explotaciones agrícolas que comprende los residuos de cultivos leñosos como restos de poda del olivar, almendro, cítricos, viñedo, etc. y los residuos de los cultivos herbáceos como la paja de cereal, cultivo del algodón, el cañote de girasol o maíz, etc.

2.5.1. Bioamasa residual de *Theobroma cacao* L. (cacao)

En el Perú, el *Theobroma cacao* L. es uno de los cultivos más relevantes, siendo la cáscara el principal residuo que se genera en torno a este, al separar la cáscara del fruto con las semillas y placenta (Graziani et al., 2002). Al no tratar adecuadamente este residuo se

convierte en un problema que pueden provocar contaminación en el agua, en el aire, afectar a los ecosistemas y a la salud humana. Awolumate (1983) menciona que las cenizas de las cáscaras del *T. cacao* son pobres en Mn, Cu, Zn pero ricas en Ca, N, K, Na, P, Fe y Mg.

2.5.2. Bioamasa residual de *Coffea arabica* (café)

En el proceso productivo de *Coffea arabica* se realiza un mecanismo denominado trillado o el descascarillado, que consiste en la separación entre el pergamino o cascarilla y grano del café. La cascarilla es una envoltura cartilaginosa de color blanco amarillento de aproximadamente 100 micrómetros de espesor (Escudero *et al.*, 2008). Esta cascarilla constituye una excelente fuente de celulosa, lignina, pentosanos, sílice y cenizas, así como otros compuestos en menor proporción (Akhtar *et al.*, 2012). Debido al alto contenido de lignina, la cascarilla de *C. arabica* es útil no solamente como fuente de energía y productos orgánicos, sino como material adsorbente en la remoción de contaminantes presente en soluciones acuosas.

2.5.3. Bioamasa residual de *Oryza sativa* (arroz)

El arroz es un producto agrícola importante que tiene un valor de exportación extremadamente alto, con producciones de hasta 2 veces por año (13 a 14 t/ha). La cáscara de arroz es el subproducto de la molienda de arroz, con 85 a 90% de silicio tras ser convertida en cenizas. Muchas investigaciones sugieren el uso de la cascarilla de arroz para devolver el silicio absorbido por la planta durante su desarrollo, en forma de ceniza. La cáscara de arroz se ha utilizado comúnmente como combustible en muchas fábricas industriales y en la generación de electricidad debido a su baja humedad y funcionamiento simple (Prada y Cortes, 2010).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El presente trabajo de investigación se llevo a cabo en el Laboratorio de Tratamiento de la contaminación de suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, políticamente se encuentra ubicado en el distrito de Rupa-Rupa, provincia de Leoncio Prado, región Huánuco. La coordenada de ubicación corresponde a 09° 18' 53" latitud sur y 75° 59' 44" longitud oeste, a una altura de 660 m.s.n.m.

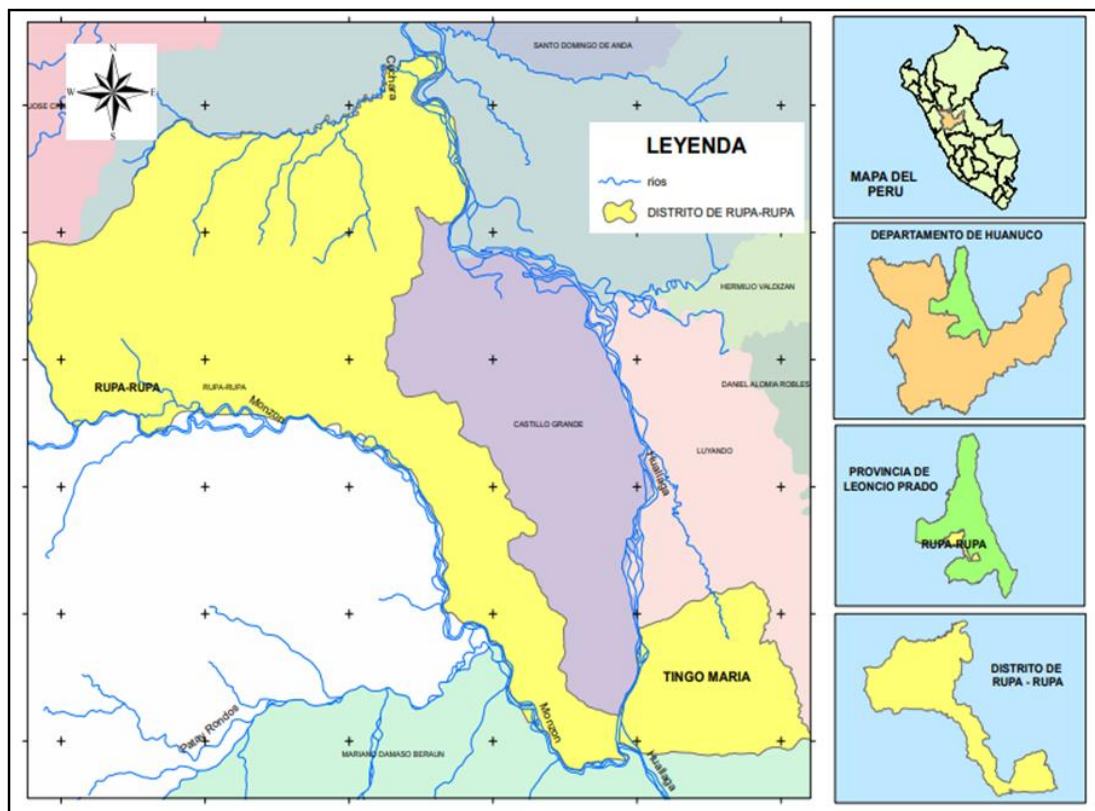


Figura 4. Ubicación política de la ciudad de Tingo María.

3.2. Aspectos ambientales

3.2.1. Ecología

El distrito de Rupa Rupa de acuerdo a la clasificación de zonas de vida o formaciones vegetales y el diagrama bioclimático de Holdridge (1978), corresponde a una formación vegetal bosque muy húmedo en transición Pre-montano Sub Tropical bmh/PST, y teniendo en

cuenta la categorización de las regiones naturales del Perú, es considerado de nominación Rupa Rupa o Selva Alta, debido a que posee un clima tropical, cálido y húmedo.

3.2.2. Temperatura

La temperatura promedio es de 24,31 °C, la temperatura máxima de 25,70 °C y una mínima promedio de 19,5 °C. La temperatura es variable, pero durante el mes de junio, por los vientos fríos del anticiclón polar marítimo ascendente de la zona austral atlántica, se registra un descenso significativo de la temperatura.

3.2.3. Precipitación

La precipitación anual promedio de 3428,8 mm., presentando alta pluviosidad. Las mayores precipitaciones se producen entre los meses de septiembre a abril y alcanza un máximo extremo en el mes de enero con un promedio mensual de 483,6 mm.

3.2.4. Humedad

La humedad relativa mensual promedio es de 85,67% y su ritmo de variación está de acuerdo al ciclo de lluvias, por lo que en las épocas de mayor precipitación se registra una mayor humedad.

3.3. Materiales

3.3.1. Materiales

- Material orgánico o biológico: biomasa residual (cáscara de *Theobroma cacao* L. “cacao”, cascarilla de *O. sativa* (arroz) y cascarilla de *C. arabica* (café), material edáfico con alto contenido en cadmio, semillas de *T. cacao*. (cacao) y material combustible (leña y ramas).
- Material de campo: sacos de 50 kg, guantes de latex, botas de jebe, pala, pico, machete, wincha 50 m, bolsas impermeables.
- Materiales e instrumentos de laboratorio: vaso de precipitación, matraces erlenmeyer 100 mL, probetas, buretas, embudos, piseta, pipeta de 10 mL, pinzas, crisoles, papel filtro, bolsa tipo masetta, regadora, regla, benier digital y termómetro digital tipo k.

- Reactivos: Ácido nítrico concentrado (HNO_3), Ácido perclórico concentrado (HClO_4), y solución extractante EDTA 0.05M.
- Equipos de protección personal: guantes de protección térmica, mascarilla de gases y guardapolvo.

3.3.2. Equipos

- Espectrofotómetro de emisión atómica ICP-OES HORIBA – Ultima Expert, microscopio electrónico de barrido TERMOCIENTIFICO Phenon Pro X, pH-metro, multiparámetro, estufa, mufla, balanza analítica, horno pirolítico.

3.4. Metodología

La investigación se ejecutó en 2 fases: Producción de biocarbón o fase I y tratamiento de suelo con dosis de biocarbón o fase II (Figura 5).

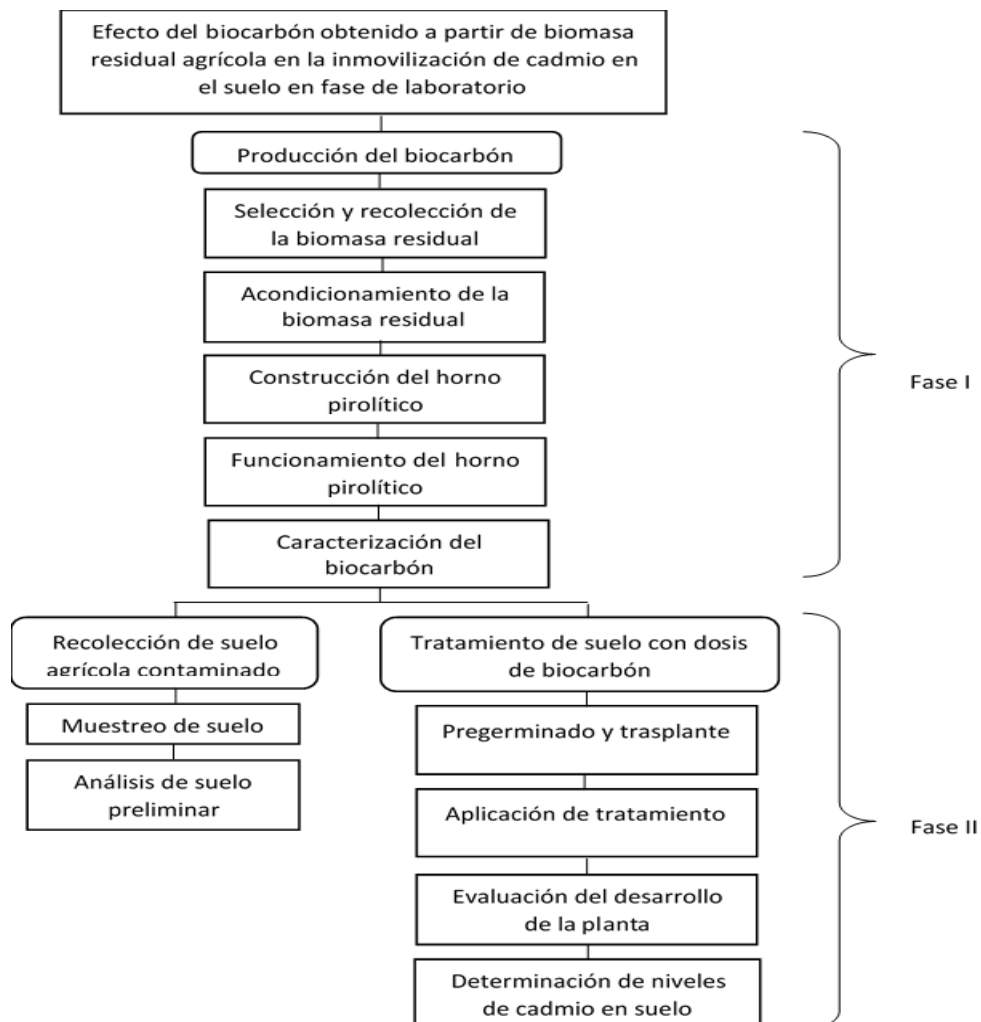


Figura 5. Diagrama de las fases de metodología.

3.4.1. Fase I: Producción de biocarbón

3.4.1.1. Selección y recolección de la biomasa residual

La bioamasa residual para la producción del biocarbón fue obtenida directamente de parcelas de cultivos agrícolas. Los residuos agrícolas de *T. cacao*. (cacao) fueron obtenidos de las parcelas de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, los residuos agrícolas de *C. arabica* (café) fue recolectado de una parcela en el distrito de Hermilio Valdizan, provincia de Leoncio Prado y los residuos de *O. sativa* (arroz) fueron recolectados de una parcela en el distrito de Uchiza, provincia de Tocache.

Se tomaron muestras homogéneas mediante recolección manual por cada tipo de biomasa residual, considerando su tamaño y volumen. Las muestras se trasladaron al Laboratorio de Tratamiento de la contaminación del suelo de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, completamente envueltas para evitar cualquier tipo de contaminación durante esta etapa.

3.4.1.2. Acondicionamiento de la biomasa residual

Las muestras recolectadas fueron secadas a temperatura ambiente, dependiendo del estado de humedad de cada una. Según Mcelligott et al. (2011) el contenido de humedad de la materia prima no debe ser mayor al 10%. En el caso del *T. cacao* debido a su alto contenido de humedad, fue llevada a la estufa durante 48 horas en un rango de temperatura de 70 – 80 °C (Guerra, 2015). Las muestras que presentaron regular tamaño y dureza se fraccionaron en partes más pequeñas para asegurar que el nivel de pirólisis sea completa.

3.4.1.3. Construcción de un horno pirolítico a escala

Guerra (2015) el horno pirolítico consistió en dos tambores cilíndricos de metal, uno de menor tamaño al interior del otro, donde se realizó el proceso de pirólisis para la producción de biocarbón a partir de diferentes tipos de biomasa residual.

El horno pirolítico (Figura 6) presentó los siguientes componentes:

- Tambor cilíndrico interno: que es la cámara interna del horno pirolítico para la colocación de la materia prima, con un orificio de 4 cm de diámetro en la base inferior cubierto con malla metálica.

- Tambor cilíndrico externo: que es la cámara de combustión externa del horno pirolítico, cuenta con orificios pequeños alrededor de hornos en la parte superior e inferior para la ventilación y la medición de la temperatura interna.
- Tapas de acero: son estructuras de acero en forma circular que sirvieron para sellar ambos tambores cilíndricos, en el cual se acondicionó una chimenea de ventilación por la parte superior del tambor cilíndrico externo.

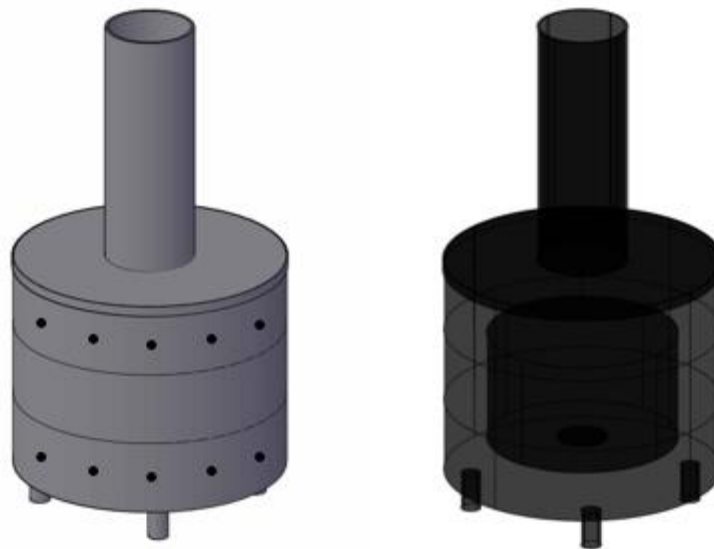


Figura 6. Horno pirolítico para la producción de biocarbón.

3.4.1.4. Funcionamiento del horno pirolítico

La biomasa residual seca fue introducida en el tambor interno del horno, en el cual se llenó por completo y se cubrió con la tapa, posteriormente se colocó dentro de la cámara o tambor externo. Entre los dos tambores existe un espacio libre que sirve para llenar los materiales combustibles como: ramas, leña, hojas secas, entre otros y se procedió a producir fuego y colocar la tapa de la cámara externa. El proceso de pirólisis se realizó en un promedio de 10 a 12 horas, monitoreando constantemente la temperatura. Al terminó del proceso se enfrió el sistema durante un periodo de 8 horas y finalmente el producto que contiene la cámara interna es el biocarbón resultante.

3.4.1.5. Caracterización del biocarbón

Análisis proximal. Se analizaron las muestras de biocarbón obtenidas a partir de los diferentes tipos de biomasa residual, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM (1984)

D1762-84:Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. Se realizó un proceso de molienda de los trozos de bicoarbón con un mortero de porcelana, luego fueron tamizadas y se realizaron los análisis que se detalla a continuación:

Contenido de humedad. Se colocó 5 g de muestra de biocarbón obtenido en una cápsula y fueron llevadas a secar a 105 °C hasta un peso constante, para luego registrar el peso final. El contenido de humedad de las muestras de biocarbón se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Contenido de humedad (\%)} = \left[\frac{(P_i - P_s)}{P_i} \right] \times 100$$

Donde:

P_i = Peso inicial

P_s = Peso seco después de secar a 105 °C

Contenido de material volátil. Se colocó en un crisol 1 g de la muestra de biocarbón previamente secado, luego los crisoles se introdujeron dentro de la mufla a 950 °C y se dejaron por un espacio de 6 minutos. Culminado el tiempo se retiró los crisoles y se colocó en una campana desecadora. El contenido de materia volátil de las muestras de biocarbón se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Materia volátil (\%)} = \left[\frac{(P_s - P_v)}{P_s} \right] \times 100$$

Donde:

P_v = Peso seco de la muestra después de somerlo a 950 °C

P_s = Peso seco de la muestra después de secar a 105 °C

Contenido de cenizas. Se colocaron las muestras que fueron utilizadas para la determinación de materia volátil dentro del horno de mufla a 750 °C durante 6 horas. Después de haber culminado el tiempo se retiró y se colocó en una campana desecadora, dejándolo enfriar por espacio de 1 hora, hasta su incineración total observando el color blancuzco de las cenizas.

El contenido de cenizas de las muestras de biocarbón se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Ceniza (\%)} = [P_c - P_v] \times 100$$

Donde:

P_c = Peso cenizas después de 750 °C

P_v = Peso seco de la muestra después de somerlo a 950 °C

Análisis de las propiedades físicas y químicas. Se llevaron a cabo los análisis del biocarbón obtenido a partir de los diferentes tipos de biomasa residual, con la finalidad de determinar las propiedades fisicoquímicas de dichos productos tales como: el nivel de pH, la conductividad eléctrica y la densidad aparente (Tabla 2).

Tabla 2. Métodos empleados en el análisis fisicoquímico del biocarbón.

| Parámetros físicos-químicos | Método |
|------------------------------------|--|
| pH | Potenciometría relación biochar – agua 1:2,5 (Thomas, 1996). |
| Conductividad eléctrica | Potenciometría relación biochar – agua 1:2,5 (Thomas, 1996). |
| Densidad Aparente | Método de la probeta. |

Análisis de composición elemental. La composición elemental del biocarbón se determinó mediante un análisis con el microscopio electrónico de barrido (MEB) con detector de energía dispersa de rayos x (EDS), que permite la identificación de los elementos que integran la superficie de la muestra. Para ello se utilizó una porción uniforme de los diferentes tipos de biocarbón, posteriormente llevarlo para su análisis en el Laboratorio Central de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Análisis de microfotografía electrónica. Las características microestructurales del biocarbón fueron analizadas por microscopía electrónica de barrido (MEB), esta técnica usa un haz de electrones para formar una imagen, que permite observar las características microestructurales de las muestras del biocarbón por su elevada resolución y visualización tridimensional (Lehmann y Joseph, 2009). Para ello se utilizó una porción uniforme de los diferentes tipos de biocarbón que se ha producido, posteriormente se le ha llevado para su

análisis en el Laboratorio Central de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

3.4.2. Fase II: Tratamiento del suelo con biocarbón

3.4.2.1. Recolección de suelo contaminado

El material edáfico procedió de una parcela en la zona de Picuruyacu, perteneciente al distrito de Castillo Grande, provincia de Leoncio Prado, region Huanuco, donde se extrajo suelo con alto contenido en cadmio para utilizarlo en la aplicación de los tratamiento con biocarbón.

Muestreo de suelo. Se realizaron los procedimientos de la “Guía de muestreo de suelo” según MINAM (2014) que indica que el muestreo aleatorio simple es recomendado para áreas homogéneas menores a 5 hectáreas con toma de muestras superficiales compuestas; es decir, sub-muestras (10 – 25 unidades) en un área y capa determinada para unir las sub-muestras individuales en una muestra compuesta. La profundidad para la toma de las muestras superficiales considerada para un suelo agrícola es de 0 a 30 cm (profundidad de aradura)

Tabla 3. Profundidad del muestreo de suelo.

| Uso de suelo | Profundidad de muestreo |
|----------------|-------------------------|
| Suelo agrícola | 0 a 30 cm (*) |
| | 30 a 60 cm |

(*) Profundidad de aradura.

Fuente: MINAM (2014).

Se realizó un muestreo aleatorio simple, en el cual se tomó 10 puntos al azar, considerando una determinada distancia o número de pasos. Las submuestras se mezclaron homogéneamente hasta tener una cantidad considerable para ser sometida a partición y obtener la muestra representativa para el análisis en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Análisis fisicoquímico preliminar del suelo. El análisis fisicoquímico de la muestra de suelo se realizó en el laboratorio de Análisis de suelos de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, siguiendo diferentes métodos de análisis (Tabla 4).

Tabla 4. Métodos empleados para el análisis fisicoquímico del suelo.

| | Parámetro | Método |
|----------|-------------------------|---|
| Físicos | Clase Textural | Hidrómetro de Bouyoucus |
| | Densidad aparente | Relación masa/volumen |
| ----- | | |
| Químicos | pH | Potenciometría relación 1:1 (agua - suelo) |
| | Materia orgánica | Método de Walkley y Black |
| | Conductividad eléctrica | Conductimetría |
| | CIC | Método de Acetato de Amonio 1N pH 7 (Suelos con pH>5,5) |
| | Cadmio disponible | Extractante EDTA 0,05M Ph7 (Westerman, 1990) |
| | Cadmio total | Digestión ácido nítrico-perclórico |

3.4.2.2. Preparación del sustrato suelo-biocarbón

La cantidad de sustrato suelo-biocarbón utilizado en cada bolsa tipo maseta fue de 1.8 kg aproximadamente y las cantidades de biocarbón a aplicarse son de acuerdo al porcentaje en peso de 6%, 8% y 10% (108g, 144g, 180g respectivamente) para cada tipo de biocarbón, para posteriormente ser mezclados. El sustrato se acondicionó en bolsas tipo maseta, considerando el testigo con contenido unicamente de suelo.

3.4.2.3. Pre germiando y transplante

Se recolectaron semillas de *T. cacao*. (cacao) de variedad CCN-51 que fueron oreadas y seleccionadas por tamaño. Luego fueron sembrados en aserrin considerando un cierto nivel de humedad. Al cabo de cuatro a cinco días se observaron las radículas de las semillas, encontrándose aptas para ser transplantadas a las bolsas tipo maseta a una profundidad del doble del diámetro de las semillas. El experimento se llevó a cabo en una cámara de crecimiento de plantas (24 ± 3 ° C y 12 h de luz) durante un período de 8 semanas (60 días).

3.4.2.4. Evaluación del desarrollo de la planta de *Theobroma cacao* L. (cacao)

Altura de planta. La evaluación de esta característica se realizó al finalizar el experimento (60 días después del transplante). Para la medición de la altura de la planta se

empleó una regla graduada en cm, desde la superficie del suelo hasta el ápice del brote inicial mayor del tallo principal.

Diámetro del tallo. La evaluación de esta característica se realizó al finalizar el experimento (60 días después del trasplante), las mediciones se realizaron utilizando un vernier digital.

Longitud radicular. La evaluación de esta característica se determinó al finalizar el experimento (60 días después del trasplante), se realizó la medición con el uso de una regla graduada en cm, desde la inserción con el esqueje hasta la parte terminal de las raíces de la planta.

Número de hojas. La evaluación de esta característica se determinó realizando un conteo de las hojas al finalizar el experimento (60 días después del trasplante), en cada uno de los tratamientos.

Peso fresco y seco. La evaluación de esta característica se determinó al finalizar el experimento (60 días después del trasplante). Se tomó en cuenta todas las partes de la planta (tallo, hoja y raíz), las cuales fueron pesadas para determinar el peso fresco (g) y se llevaron las muestras a la estufa a 105 °C durante 48 horas para posteriormente ser pesadas para obtener el peso seco (g).

3.4.2.5. Determinación de los niveles de cadmio

Cadmio disponible. El análisis de cadmio disponible en el suelo se realizó con el procedimiento efectuado por Westerman (1990) mediante la utilización de un extractante EDTA 0,05M pH 7. El procedimiento consiste en secar el suelo y tamizarlo con malla de 2mm, para luego pesar 5 g de suelo y colocarlo en un vaso agregando 20 ml de solución Extractante (EDTA 0,05M; pH 7). Luego colocar en el Agitador por 60 a 45 minutos y filtrar con papel filtro whatman N° 40. Finalmente se realizó las lecturas de las muestras en el espectrometro de emisión óptica ICP OES para el análisis del elemento de interés.

Cadmio total. El análisis de cadmio total en el suelo y planta se utilizó el metodo de digestión por via húmeda, mediante ataque de ácido nítrico/perclórico. El procedimiento consistió en secar el suelo y tamizarlo con malla de 2 mm, luego pesar 0,5 g de muestra y colocarlo en un matraz adicionandole 10 ml de solución ácido nítrico/perclórico 1:4 y cubrir

con un embudo de cristal dejando reposar por 30 minutos a temperatura ambiente. Luego calentar la parrilla a 150 °C y dejar hasta que la muestra se aclare y se seque casi por completo (aprox. 0,5 ml). Las soluciones restantes se transfirió a matraces para enrasar a una medida cuantitativa de 25 ml. Finalmente se realizó las lecturas de las muestras en el espectrómetro de emisión óptica ICP OES para el análisis del elemento de interés.

3.4.2.6. Eficiencia de inmovilización de cadmio

Se determinó el porcentaje de inmovilización de cadmio en el suelo con los resultados del análisis de la concentración de cadmio disponible en el suelo en cada tratamiento después de la aplicación de diferentes tipos y dosis de biocarbón. La eficiencia de inmovilización se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$\% E = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100$$

Donde:

% E = es la eficiencia de inmovilización de cadmio en el suelo.

C_o = concentración inicial de cadmio en el suelo (mg/kg).

C_f = concentraciones final de cadmio en el suelo (mg/kg).

3.5. Método de la investigación

3.5.1. Tipo y diseño de la investigación

La investigación es de tipo aplicada, según Rodríguez (2005) también es conocida como activa o dinámica, porque tiene la finalidad de corroborar la teoría de manera directa. Se aplica dicha investigación a problemas concretos, en circunstancias y características concretas.

El diseño de la investigación es experimental, según Rodríguez (2005), se presenta mediante la manipulación de una variable con la finalidad de poder describir de que modo o porque causas se ocasiona una situación o acontecimiento. En el estudio se aplicaron diferentes tipos y cantidades de biocarbón para evaluar el efecto de inmovilización de cadmio en el suelo; por ende se utilizaron diversas técnicas e instrumentos para recolectar datos, relacionar las variables y dar respuesta a la interrogante.

3.5.2. Variables en estudio

La variable que se propone explicar se considera como la variable dependiente y la variable que explica el cambio de esta, es considerada como variable independiente (Namakforoosh, 2005). Para el presente estudio se propusieron las siguientes variables:

Variable independiente : Biocarbón.

Variable dependiente : Inmovilización de cadmio en el suelo.

Variable interviniente : Condiciones de laboratorio.

3.5.3. Componentes en estudio

3.5.3.1. Planta

- *Theobroma cacao* L. (cacao).

3.5.3.2. Tipo de biomasa (A)

- A₁= cáscara de *Theobroma cacao* L. (cacao).
- A₂= cascarilla de *Coffea arabica* (café).
- A₃= cascarilla de arroz *Oryza sativa* (arroz).

3.5.3.3. Concentración de biocarbón (B)

- B₁ = 6 % de biocarbón
- B₂ = 8 % de biocarbón.
- B₃ = 10 % de biocarbón.

3.5.4. Diseño experimental

El diseño experimental adaptado para el presente estudio es el Diseño completo al azar (DCA) con arreglo factorial de 3 x 3 x 5 repeticiones, considerando más un adicional (testigo).

Tabla 5. Unidades experimentales del estudio.

| Biomasa | Tratamientos | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | <i>T. cacao L</i> | | | <i>C. arabica</i> | | | <i>O. sativa</i> | | | |
| | Proporción | 6% | 8% | 10% | 6% | 8% | 10% | 6% | 8% | 10% |
| Repeticiones | T ₀ | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ | T ₅ | T ₆ | T ₇ | T ₈ | T ₉ |
| R₁ | T ₀ R ₁ | T ₁ R ₁ | T ₂ R ₂ | T ₃ R ₁ | T ₄ R ₁ | T ₅ R ₁ | T ₆ R ₁ | T ₇ R ₁ | T ₈ R ₁ | T ₉ R ₁ |
| R₂ | T ₀ R ₂ | T ₁ R ₂ | T ₂ R ₃ | T ₃ R ₂ | T ₄ R ₂ | T ₅ R ₂ | T ₆ R ₂ | T ₇ R ₂ | T ₈ R ₂ | T ₉ R ₂ |
| R₃ | T ₀ R ₃ | T ₁ R ₃ | T ₂ R ₄ | T ₃ R ₃ | T ₄ R ₃ | T ₅ R ₃ | T ₆ R ₃ | T ₇ R ₃ | T ₈ R ₃ | T ₉ R ₃ |
| R₄ | T ₀ R ₄ | T ₁ R ₄ | T ₂ R ₅ | T ₃ R ₄ | T ₄ R ₄ | T ₅ R ₄ | T ₆ R ₄ | T ₇ R ₄ | T ₈ R ₄ | T ₉ R ₄ |
| R₅ | T ₀ R ₅ | T ₁ R ₅ | T ₂ R ₆ | T ₃ R ₅ | T ₄ R ₅ | T ₅ R ₅ | T ₆ R ₅ | T ₇ R ₅ | T ₈ R ₅ | T ₉ R ₅ |



Figura 7. Esquema de distribución de las unidades experimentales al azar.

El modelo aditivo lineal consideró la siguiente ecuación:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \epsilon_{ij} \quad (\text{Calzada, 1970})$$

Donde:

Y_{ij} = Es la respuesta obtenida en la unidad experimental correspondiente al k-ésimo bloque a la cual se le aplicó el i-ésimo nivel del factor A, con el j-ésimo nivel del factor B.

T_i = Efecto del i -ésimo tratamiento.

μ = Efecto de la media general

ϵ_{ij} = Efecto aleatorio del error experimental obtenido en la j -ésima repetición sujeto a la aplicación del i -ésimo tratamiento.

Para :

$i = 1, 2, \dots, 9$ tratamientos

$j = 1, 2, \dots, 5$ repeticiones

3.5.5. Análisis estadístico

Se realizó análisis de variancias (ANOVA) para un experimento con Diseño Completo al Azar con arreglo factorial y se realizó la prueba de Tukey ($\alpha=0,05$) con el software Excel y IBM SPSS Statistics 20.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Producción y caracterización del biocarbón obtenido a partir de biomasa residual agrícola

4.1.1. Rendimiento de la producción de Biocarbón

Se registró que de los tres tipos de biomasa residual agrícola utilizada para la producción de biocarbón, dos de ellas, la cascarilla de *C. arabica* y *O. Sativa* alcanzaron rendimientos muy cercanos al 50%, mientras que, en el caso del biocarbón de la cáscara de *T. cacao*, el rendimiento fue muy bajo debido a que no llegó ni al 10,0% de producción de biocarbón (Figura 8).

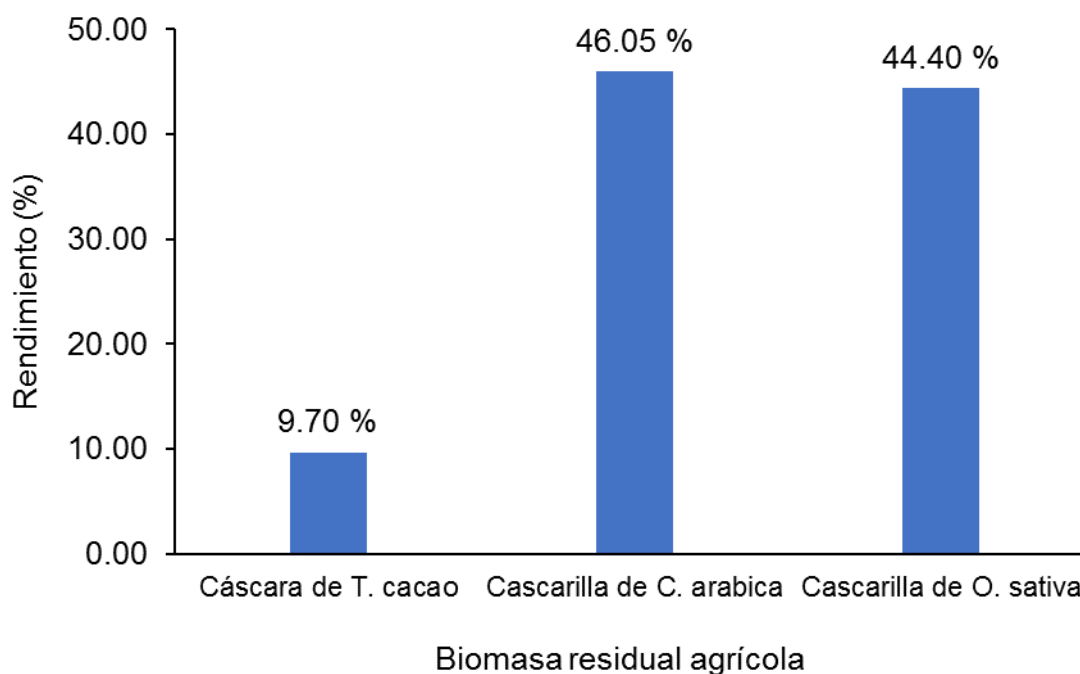


Figura 8. Rendimientos en la producción del biocarbón.

El efecto del tipo de biomasa utilizada va a depender por su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, ya que la descomposición de estos compuestos varía en ciertos rangos de temperatura y se ve influenciado en el rendimiento del biocarbón (Zheng et al., 2012). Asimismo, Garaycochea (2020) determinó que el rendimiento de biocarbón es inversamente proporcional al contenido de humedad del material precursor, obteniendo un 9,58% de humedad y rendimiento de 40,31% para el biocarbón de la cascarilla de *O. Sativa*.

4.1.2. Análisis proximal

El biocarbón obtenido a partir de los tres tipos de biomasa residual agrícola registró un contenido de humedad bajo, que fue inferior al 10%, siendo el biocarbón producido a partir de la cáscara *T. cacao* con 6,08%, el de mayor porcentaje de humedad. El porcentaje de material volátil fue inferior al 30% para los diferentes tipos de biocarbón. En cuanto al porcentaje de ceniza, el biocarbón producido a partir de la cascarilla de *O. sativa* presentó un porcentaje elevado a diferencia del biocarbón de cascarilla de *C. arabica*, que obtuvo un porcentaje mínimo (Tabla 6).

Tabla 6. Análisis proximal de los diferentes tipos de biocarbón.

| Bioamasa residual | Humedad (%) | Materia volátil (%) | Ceniza (%) |
|---------------------------------|-------------|---------------------|------------|
| Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6,08 | 28,69 | 18,44 |
| Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 2,89 | 27,17 | 3,24 |
| Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 3,23 | 24,04 | 38,20 |

El biocarbón presentó un bajo contenido de humedad menor al 10% y se relaciona directamente proporcional al contenido de humedad de su materia prima. El porcentaje de humedad en el biocarbón de *T. cacao* fue de 6,08% (Guerra, 2015) y en el biocarbón de la cascarilla de *O. Sativa* fue de 3,3% (Belalcazar, 2013) similar a los valores obtenidos en el presente estudio.

Guerra (2015) describe que existe un efecto significativo del tipo de materia prima sobre el contenido de material volátil, registrando valores inferiores al 40% en los diferentes tipos de biocarbón que obtuvo a partir de diferentes tipos de biomasa residual de sistemas agroforestales, donde el valor más alto de 32,04% fue en el biocarbón de la cáscara de *T. cacao*; de acuerdo a los resultados del presente estudio se coincide al no sobrepasar el 40% de contenido de material volátil y el valor mas alto de 28,69% registradó en el biocarbón de la cáscara de *T. cacao*.

La cantidad y la composición de la ceniza puede influir sobre ciertas características deseadas en el biocarbón (IBI, 2013). En el presente estudio el biocarbón de *C. arabica* presentó un bajo contenido de ceniza de 3,24% y mantiene relación al 3,1% obtenido por Herrera et al. (2018). Por otro lado el biocarbón de *O. sativa* presentó un alto contenido de ceniza de 38,20% que se diferencia a lo obtenido por Guevara (1995), citado por Quinceno y Mosquera (2010) con valores de 13,06%.

4.1.3. Análisis de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón

La suspensión biocarbón - agua presentó pH de neutro a básico, el biocarbón de la cascara de *T. cacao* registró el valor más alto con un pH = 9,47. En la conductividad eléctrica se puede apreciar valores extremos desde 0,28 dS/m para el biocarbón de la cascarilla de *O. sativa* hasta un valor promedio de 2,53 dS/m correspondiente al biocarbón producido a partir de la cascarilla de *C. arabica* (Tabla 7).

La densidad aparente más baja fue la del biocarbón de cascarilla de *O. sativa* de 0,34 gr/cm³ y la más alta del biocarbón de cascarilla de *C. arabica* 0,54 gr/cm³, muy similar a la densidad aparente del biocarbón de la cáscara del *T. cacao* 0,51 gr/cm³ (Tabla 7).

Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas de los tipos de biocarbón.

| Bioamasa residual | pH | CE (ds/m) | DA (gr/cm ³) |
|---------------------------------|------|-----------|--------------------------|
| Cáscara de <i>T. cacao</i> | 9,47 | 1,15 | 0,51 |
| Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 8,67 | 2,53 | 0,54 |
| Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 7,44 | 0,28 | 0,34 |

CE: Conductividad eléctrica; DA: Densidad aparente.

El pH es una propiedad muy importante debido a que es un determinante directo de los efectos en la relación suelo – biocarbón– planta y estará en función a la materia prima originaria y de las condiciones operacionales (Mcelligot et al., 2011). En el presente estudio la media de pH fue 8.5, que guardan relación a lo descrito por Escalante et al. (2016) con una media de pH de 8,1. Otros análisis realizados al biocarbón de la cascarilla de *O. sativa* reportan valores altos de pH de 8,72 (Belalcazar, 2013) y de 8,30 (Garaycochea, 2020) superiores a lo obtenido en el presente estudio.

La conductividad eléctrica fue superior a 1 000 μ S/cm, a excepción del biocarbón derivado de la cáscara de *O. sativa* ($\leq 300 \mu$ S/cm), valores similares a lo descrito por Lehmann & Joseph (2009). Así mismo, Garaycochea (2020) describe que la conductividad eléctrica presenta diferencias significativas en los tipos de biocarbón, registrando un valor alto para el biocarbón de *C. arabica* (5010 μ S/cm), significativamente mayor al biocarbón de *O. sativa* (740 μ S/cm). En el presente estudio se guarda la misma relación pero se presentó el valor más alto (1150 μ S/cm) en el biocarbón de *T. cacao*.

Mcelligott et al. (2011) menciona que una característica general del biocarbón es una densidad promedio de $0,3 \text{ mg/m}^3$, esto se explica por su naturaleza porosa. De acuerdo a los valores obtenidos se observa una heterogeneidad en la densidad aparente, el biocarbón de *T. cacao* presenta un valor de $0,51 \text{ mg/m}^3$, superior a lo descrito por Guerra (2015) que determinó una densidad aparente de $0,245 \text{ mg/m}^3$.

4.1.4. Análisis de la composición elemental del biocarbón

En la Figura 9 se presenta el porcentaje de elementos en las zonas superficiales de las muestras de biocarbón, en la que predomina el carbono y oxígeno. El biocarbón derivado de la cáscarilla de *C. arabica* tiene el mayor porcentaje de carbono (79,96%) y el oxígeno esta presente en mayor porcentaje en el biocarbón de la cascarilla de *O. sativa* (32,63 %). En el análisis del biocarbón de la cascarilla de *O. sativa* se registró un porcentaje elevado de silicio (38.20%), debido a la composición teórica de su materia prima, ya que es un elemento que no sufre disociación ante la incineración de las muestras. Además en el biocarbón de la cascarilla de *O. sativa* se presentaron elementos como tianio (15,12%), estroncio (15,60%) y cesio (4,26%) y en en caso de la cascarilla de *C. arabica* se logró observar contenidos de elementos como el indio (52,49%) y el cromo (13,95%).

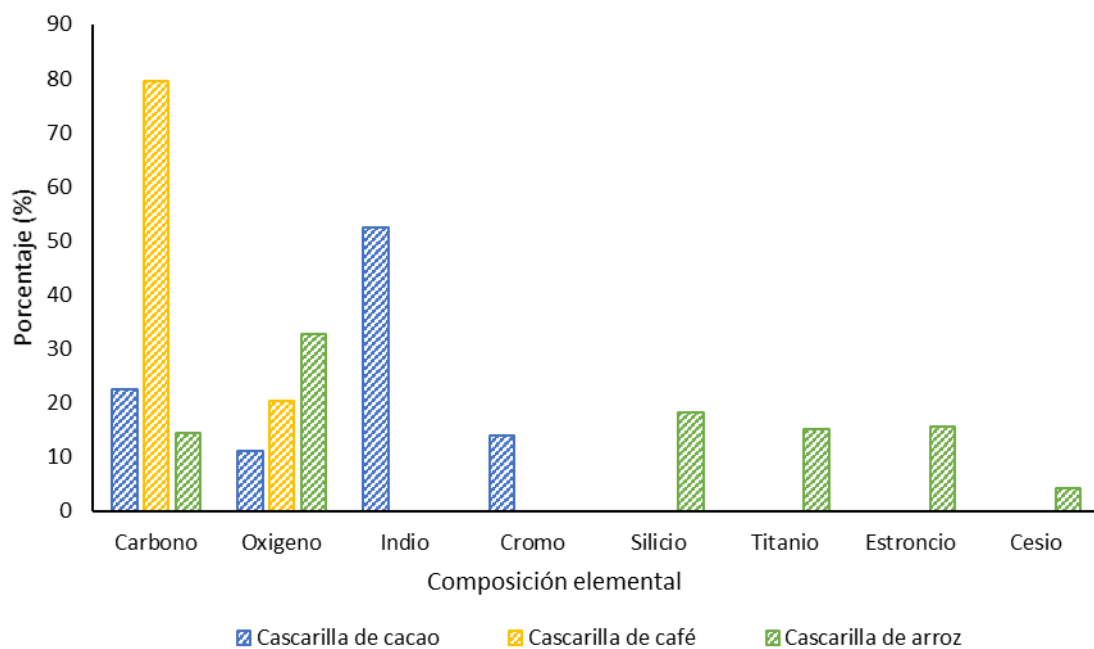


Figura 9. Composición elemental de los diferentes tipos de biocarbón.

La composición del biocarbón va a depender de las condiciones en las que se produce la pirólisis y la materia prima, produciendo diferencias significativas en el contenido y disponibilidad de los nutrientes para las plantas (Gaskin et al., 2007). Herrera et al. (2018) determinaron altos porcentajes de carbono y oxígeno, y adicionalmente Na, K, Ca, Mg, Si, Al, S, P en mínimos porcentajes en muestras de biocarbón a partir de diferentes materias primas.

4.1.5. Análisis de microfotografía electrónica del biocarbón

En la Figura 10 se observa las características microestructurales del bicocarbón de la cáscara de *T. cacao*, en la imagen de magnificación de 1200x, se puede evidenciar una estructura con escasos poros, heterogeneidad de las fibras lignocelulósicas, ruptura y falta de orden en la organización y dirección. En la imagen de magnificación de 2000x se observa que las fibras tienen enlaces resistentes, puesto que no hay espacios entre sí.

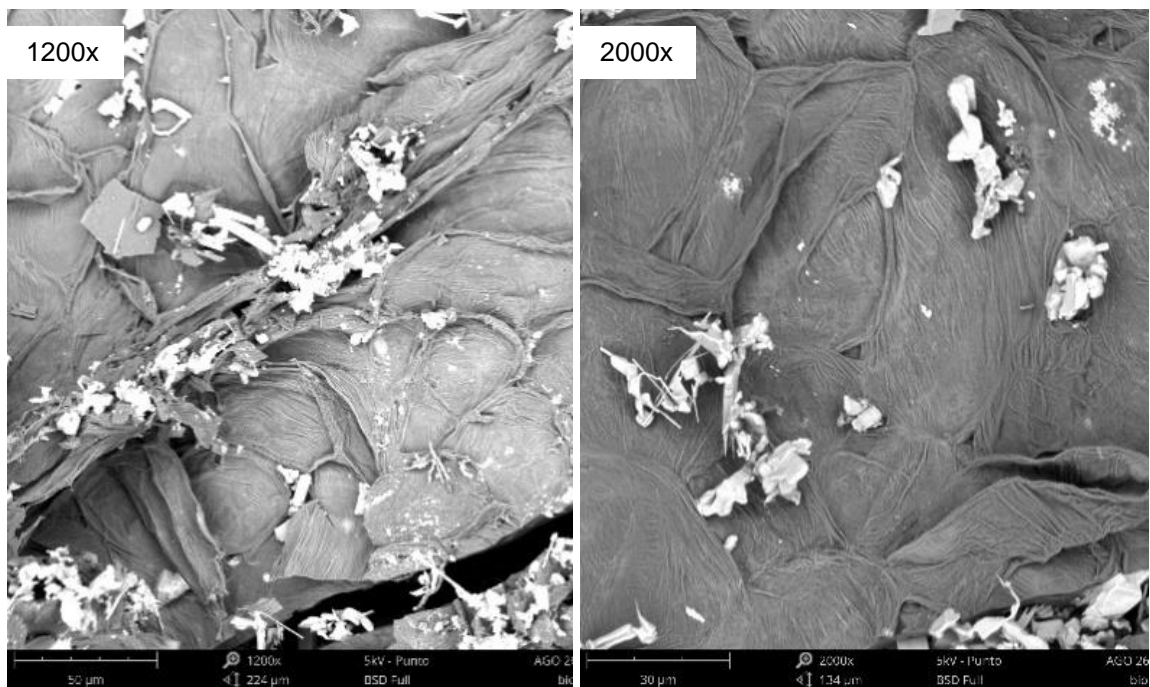


Figura 10. Microfotografía de MEB del bicocarbón de la cáscara del *T. cacao*.

En la Figura 11 se observa las características microestructurales del bicocarbón producido a partir de la cáscarilla de *C. arabica*, en la imagen de magnificación de 700x y de magnificación de 1500x, se puede apreciar que existe una cantidad significativa de poros muy pequeños que tienen formas alargadas. Asimismo se aprecia partículas de gran tamaño pero de forma irregular, que podrían atribuirse a las cenizas, como un residuo sólido que contiene especies no combustibles, y que están unidas a la superficie del biocarbón.

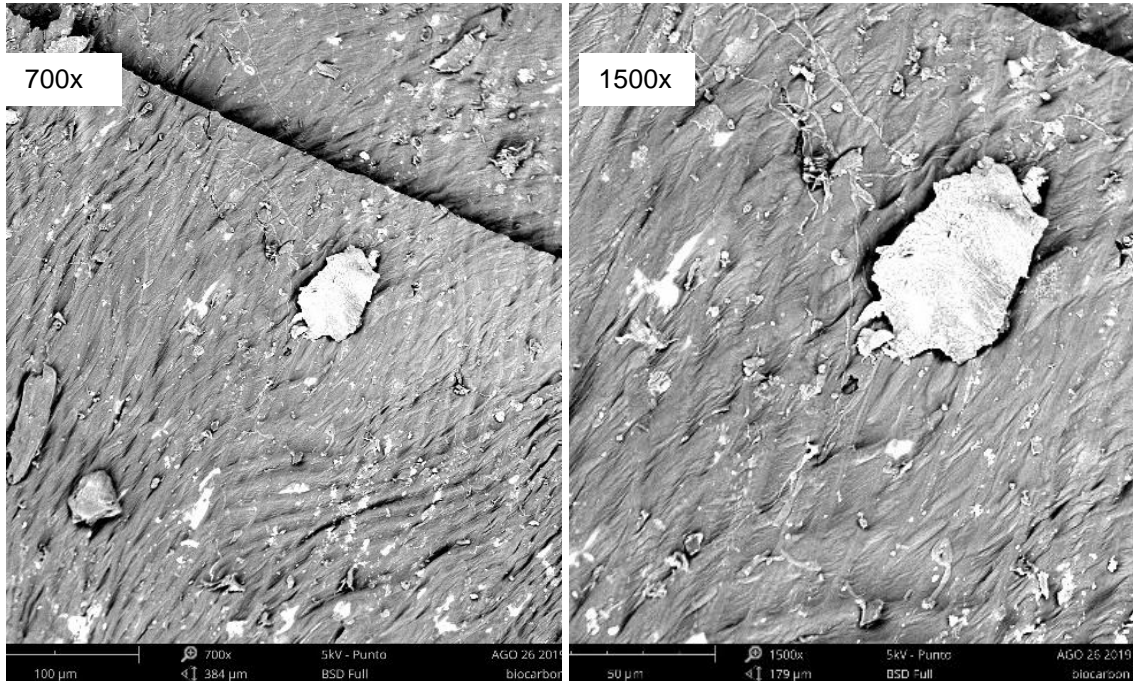


Figura 11. Microfotografía de MEB del biocarbón de la cáscara del *C. arabica*.

En la Figura 12 se observa las características microestructurales del biocarbón de la cáscarilla de *O. sativa*. En la imagen de magnificación de 205x se observan formas de picos y surcos en la superficie, además de un fraccionamiento de la muestra y rompimientos entre las fibrillas. En la imagen de magnificación 1000x se puede apreciar la porosidad (microporos) con formas y tamaños diversos que están localizados en la superficie del biocarbón.

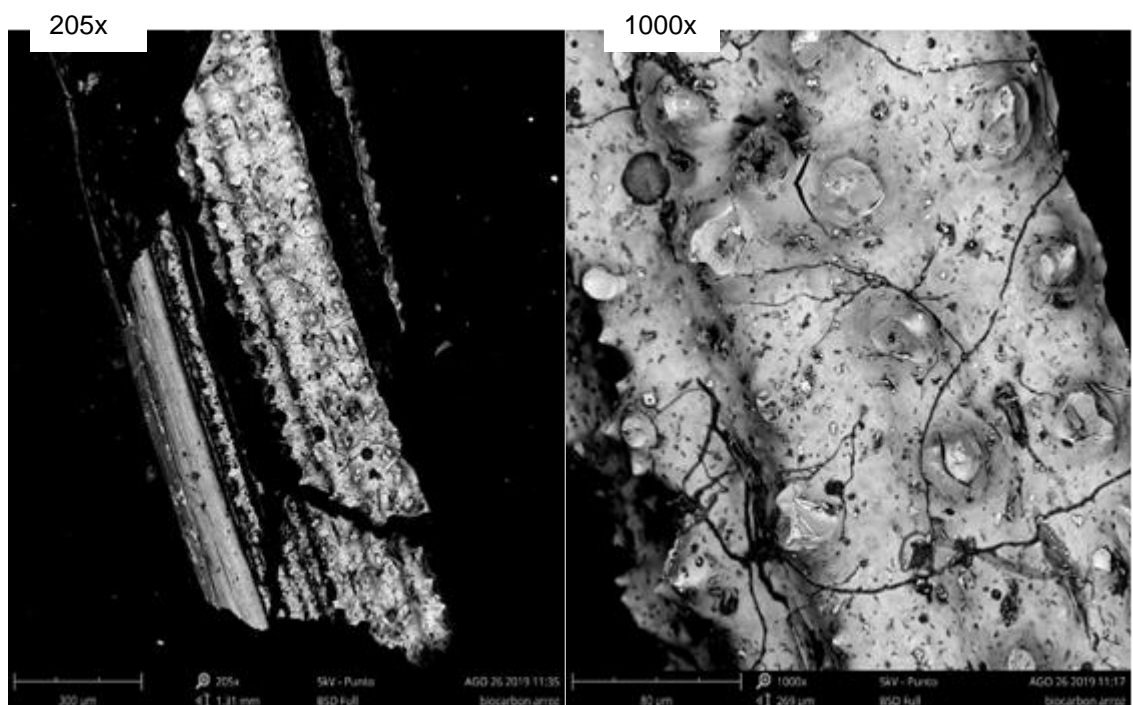


Figura 12. Microfotografía de MEB del biocarbón de la cascarilla del *O. sativa*.

El biocarbón está conformado por partículas de diferentes tamaños, lo que depende de la fuente y tamaño de la bioamasa (Lehmann et al., 2011). La distribución del tamaño de partículas depende de la materia prima y la temperatura de producción, lo que ocasiona un desgaste del material orgánico durante el proceso térmico (Olmo, 2016).

4.2. Efecto del biocarbón en el desarrollo de las plantas de *Theobroma cacao* L.

4.2.1. Altura de las plantas

El uso de diferentes tipos de biomasa presentó efectos estadísticos significativos sobre la altura total de plantas; en caso de los demás factores y la interacción no se encontró diferencias estadísticas; además, no se diferenciaron efectos entre los factores vs el testigo. Los datos obtenidos para la altura presentaron comportamientos favorables por encontrarse dentro del intervalo considerado para experimentos (Tabla 8).

Tabla 8. ANVA para la altura en plantas de *T. cacao* sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón.

| Fuente de variación | SC | GL | CM | Fc | Valor P |
|-----------------------------|---------|----|--------|--------|----------------------|
| Entre grupos | 153,101 | 9 | 17,011 | 1,902 | 0,0797 ^{ns} |
| Tipo de biomasa (A) | 77,152 | 2 | 38,576 | 4,3129 | 0,0201* |
| Porcentaje de biocarbón (B) | 21,142 | 2 | 10,571 | 1,1818 | 0,3172 ^{ns} |
| Interacción A x B | 41,836 | 4 | 10,459 | 1,1693 | 0,3388 ^{ns} |
| Factores vs testigo | 12,971 | 1 | 12,971 | 1,250 | 0,2690 ^{ns} |
| Error experimental | 357,776 | 40 | 8,944 | | |
| Total | 510,877 | 49 | | | |

CV: 11,50%; ns: no significativo; *: significativo.

La prueba de comparación de medias de Tukey para los factores en estudio registró efectos principales en la altura al utilizar los tipos de biomasa, siendo mucho mayor los efectos en la cascarilla del *C. arabica* (a_2) con una media de 27,29 cm, y con menores alturas al emplear la cáscara de *T. cacao* (a_1) con una media de 24,34 cm. En caso de la proporción de biocarbón, no se reportó diferencias estadísticas, pero el mayor promedio se observó al utilizar 8,0% de biocarbón (b_2), aunque la variabilidad fue mayor; en lo que respecta al

contraste de los factores con el testigo, no se logró demostrar diferencias estadísticas significativas, siendo numéricamente superior la media de los factores en estudio (Figura 13).

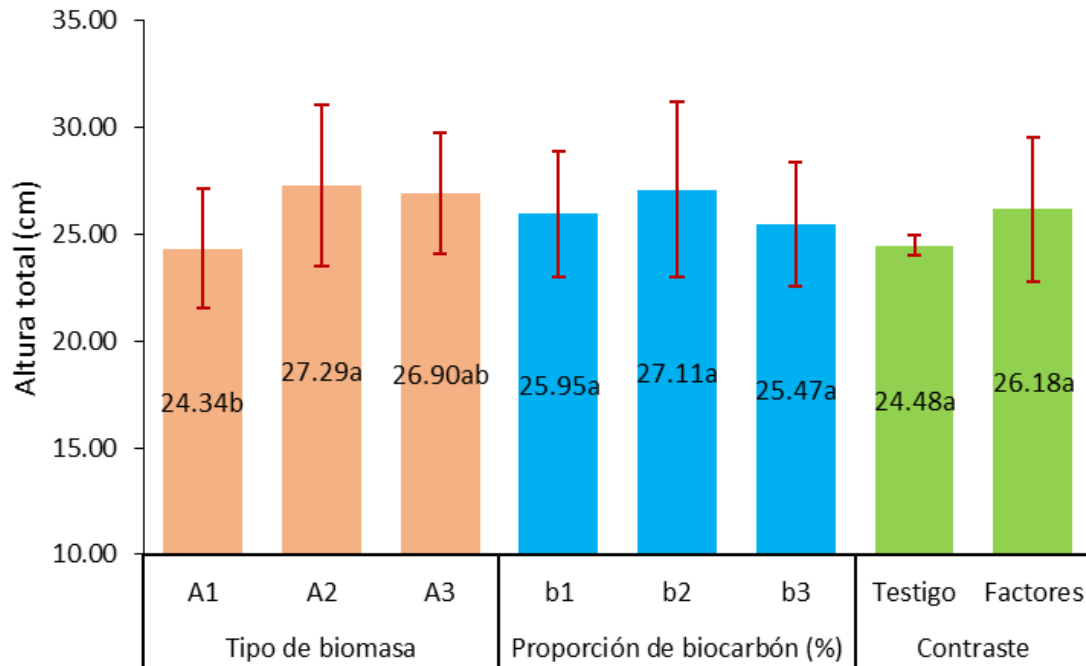


Figura 13. Efecto principal del tipo de biomasa, concentración de biocarbón y el contraste con el testigo para la altura en plantas de *T. cacao*.

La aplicación del biocarbón ha demostrado muchos beneficios ambientales, así como un aumento significativo de crecimiento de la planta (Kookana et al., 2011 y Powlson et al., 2011). El efecto de la aplicación del biocarbón implica un estímulo en el desarrollo de la zona del meristemo (Lehmann et al., 2011), responsable del crecimiento de la planta. Según los resultados registrados, sí se presentaron efectos al utilizar el biocarbón de diferentes tipos de biomasa, siendo mucho mayor con el biocarbón de cascarilla de *C. arabica*.

4.2.2. Número de hojas por planta

El uso de diferentes tipos de biomasa presentó efectos estadísticos significativos sobre la variable número de hojas por plantas; el porcentaje de biocarbón aplicado no presentó significancia estadística, mientras que en caso de la interacción entre los niveles de ambos factores en estudio se observó significancia estadística; además, hubo diferencias estadísticas de los efectos entre los factores vs el testigo. Los datos obtenidos para el número de hojas presentaron comportamientos favorables por encontrarse dentro del intervalo considerado para experimentos (Tabla 9).

Tabla 9. ANVA para el número de hojas en plantas de *T. cacao* sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón.

| Fuente de variación | SC | GL | CM | Fc | Valor P |
|-----------------------------|--------|----|-------|--------|----------------------|
| Entre grupos | 16,800 | 9 | 1,867 | 2,963 | 0,0085** |
| Tipo de biomasa (A) | 5,911 | 2 | 2,956 | 4,6914 | 0,0148* |
| Porcentaje de biocarbón (B) | 0,178 | 2 | 0,089 | 0,1411 | 0,8688 ^{ns} |
| Interacción A x B | 7,156 | 4 | 1,789 | 2,8395 | 0,0366* |
| Factores vs testigo | 3,556 | 1 | 3,556 | 4,439 | 0,0404* |
| Error experimental | 25,200 | 40 | 0,630 | | |
| Total | 42,000 | 49 | | | |

CV: 18,04%; ns: no significativo; *: significativo; **: altamente significativo.

En consideración a la prueba de Tukey para los factores en estudio, se registró efectos principales del tipo de biomasa sobre la cantidad de hojas por planta, siendo mucho mayor el efecto en la cascarilla del *C. arabica* (a_2) con una media de 4,87 hojas, mientras que el promedio menor se observó al emplear la cáscara de *T. cacao* L. (a_1) con un valor de 1,0 hojas. La proporción de biocarbón alcanzó mayor promedio (4,53 hojas) al utilizar 8,0% y 10,0% de biocarbón (b_2 y b_3) y de la misma manera, respecto al contraste de los factores con el testigo, hubo diferencias estadísticas significativas (Figura 14).

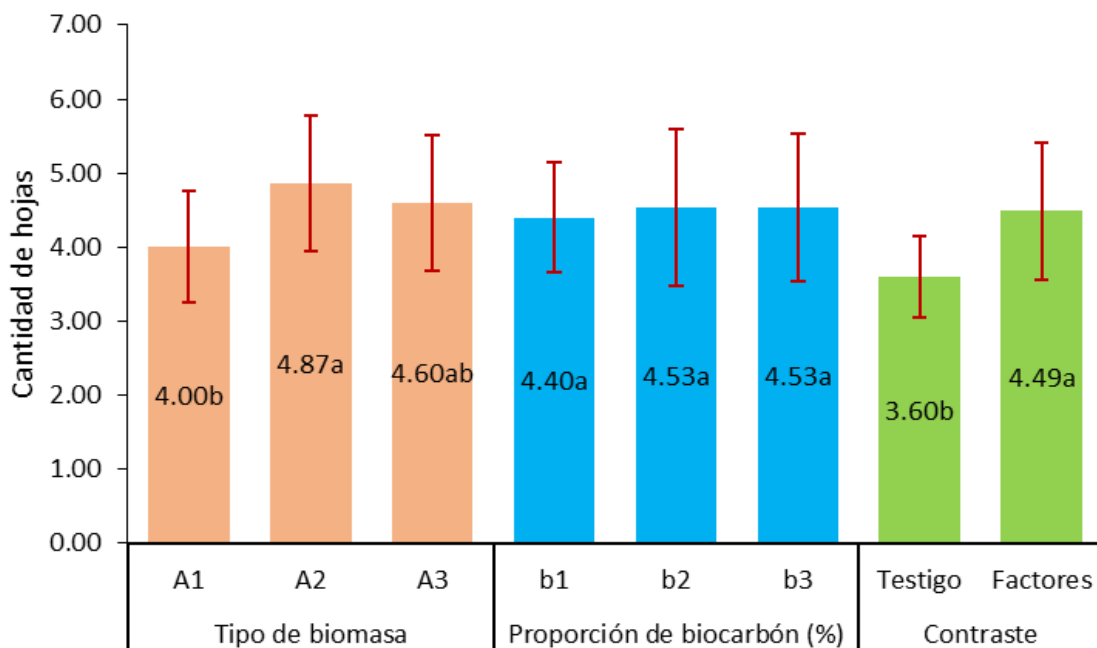


Figura 14. Efecto principal de los factores en estudio y el contraste con el testigo del número de hojas en plantas de *T. cacao*.

Al analizar el efecto de los niveles del factor A en B, se observa que utilizar cáscara de *T. cacao* L. (a₁) en diferentes concentraciones de biocarbón y el testigo no generan diferencias estadísticas significativas sobre la cantidad de hojas en las plantas de *T. cacao*, en caso de la cascarilla de *C. arabica* el mayor efecto se observa al utilizar 10,0% de biocarbón donde la media fue 5,60 hojas/planta y en caso de la cascarilla de *O. sativa* sobresalió la aplicación de 6,0% de biocarbón con una media de 4,40 hojas/planta. Analizando los niveles del factor B en el factor A, solo se registró diferencias de efectos en el nivel b₃ (10,0% de concentración de biocarbón). El mejor efecto se observó en la combinación cascarilla de *C. arabica* al 10,0% de concentración (a₂b₃) con una media de 5,60 hojas/planta (Tabla 10).

Tabla 10. Efecto simple para la cantidad de hojas en *T. cacao* sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón.

| Factores | Concentración de biocarbón | | | Testigo | Valor P | |
|-----------------|----------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|
| | 6,00% | 8,00% | 10,00% | | | |
| Tipo de biomasa | <i>T. cacao</i> L. | 4,20 ^{a/a} | 4,00 ^{a/a} | 3,80 ^{a/b} | 3,60 ^{a/-} | 0,621 ^{ns} |
| | <i>C. arabica</i> | 4,60 ^{ab/a} | 4,40 ^{ab/a} | 5,60^{a/a} | 3,60 ^{b/-} | 0,006 ^{**} |
| | <i>O. sativa</i> | 4,40 ^{ab/a} | 5,20 ^{a/a} | 4,20 ^{ab/b} | 3,60 ^{b/-} | 0,040 [*] |
| Testigo | 3,60 ^{-/a} | 3,60 ^{-/a} | 3,60 ^{-/b} | | | |
| Valor P | 0,192 ^{ns} | 0,072 ^{ns} | <0,001 ^{**} | | | |

ns: no significativo; *: significativo; **: altamente significativo. Letras diferentes demuestran significancia estadística.

Al evaluar el número de hojas en las plántulas de *T. cacao* L. con aplicación de biocarbón se presentaron efectos significativos respecto al contraste de los factores con el T₀ o testigo. Carter et al. (2013) encontraron diferencias significativas en el uso de biocarbón de cascarilla de *O. sativa* en el número de hojas en plantas de lechugas (*Lactuca sativa*) y repollo (*Brassica chinensis*) especialmente cuando se pueden incorporar otras enmiendas orgánicas al suelo junto con el biocarbón.

4.2.3. Diametro del tallo

El uso de diferentes tipos de biomasa presentaron efectos estadísticos significativos sobre el diámetro del tallo en las plantas de *T. cacao*; en caso del porcentaje de biocarbón y la interacción de ambos factores no se encontró diferencias estadísticas significativas; de manera contraria, se reporta efectos significativos entre los factores vs el testigo. Los datos obtenidos

para el diámetro del tallo presentaron comportamientos favorables por encontrarse dentro del intervalo considerado para experimentos (Tabla 11).

Tabla 11. ANVA para el diámetro del tallo en *T. cacao* sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón.

| Fuente de variación | SC | GL | CM | Fc | Valor P |
|-----------------------------|-------|----|-------|--------|----------------------|
| Entre grupos | 1,472 | 9 | 0,164 | 2,198 | 0,0427* |
| Tipo de biomasa (A) | 0,815 | 2 | 0,407 | 5,4769 | 0,0079** |
| Porcentaje de biocarbón (B) | 0,103 | 2 | 0,051 | 0,6902 | 0,5073 ^{ns} |
| Interacción A x B | 0,149 | 4 | 0,037 | 0,4997 | 0,7361 ^{ns} |
| Factores vs testigo | 0,406 | 1 | 0,406 | 4,817 | 0,0330* |
| Error experimental | 2,975 | 40 | 0,074 | | |
| Total | 4,447 | 49 | | | |

CV: 7,92%; ns: no significativo; *: significativo; **: altamente significativo.

Con la prueba de Tukey para los factores en estudio, se registró efectos principales en el diámetro del tallo al utilizar los tipos de biomasa, siendo mayor los efectos en la cascarilla del *C. arabica* (a₂) y *O. sativa* (a₃) con medias de 3,55 y 3,59 mm respectivamente; mientras que, en la proporción de biocarbón, no se reportó diferencias estadísticas significativas, pero el mayor promedio se observa al utilizar 8,0% de biocarbón (b₂). Respecto al contraste de los factores con el testigo, se observó la existencia de diferencias estadísticas significativas con el cual se demuestra una mayor la media en los factores considerados en el estudio (Figura 15).

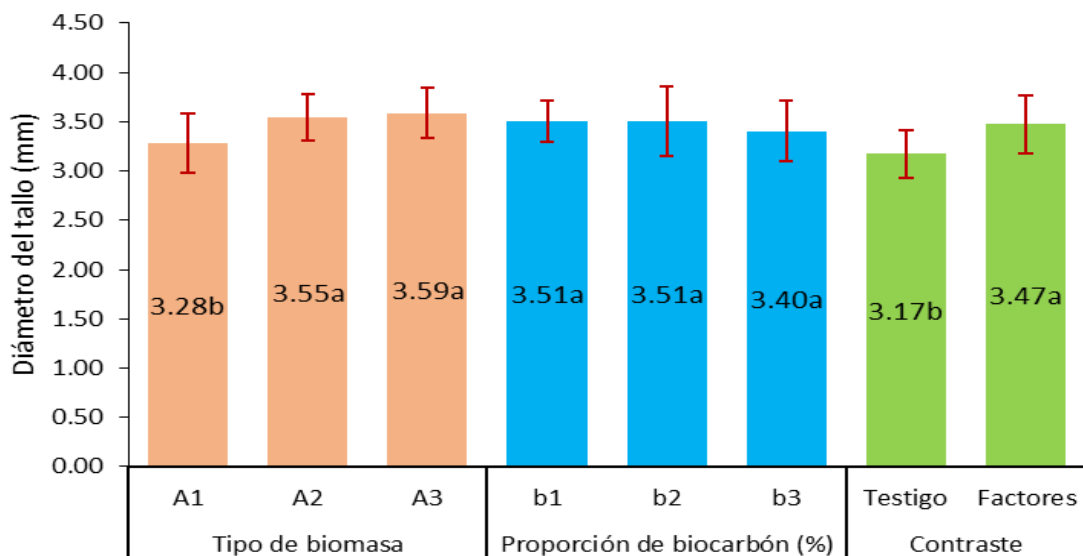


Figura 15. Efecto principal de los factores en estudio y el contraste con el testigo para el diámetro del tallo en *T. cacao*.

La aplicación de biocarbón presentó efectos significativos en el diámetro del tallo alcanzado por las plántulas de *T. cacao* L. respecto al contraste de los factores con el T₀ o testigo. Tamayo y Muñoz (2020) aplicaron biocarbón de *T. cacao* en un cultivo de *Phaseolus vulgaris* (frejol), y observaron que la proporción de 2% biocarbón, presentó plantas con mejor calidad y con un índice de esbeltez mayor, con respecto a la proporción de 4 % y al tratamiento control, que indican plantas con un índice de esbeltez menor.

4.2.4. Longitud radicular

El uso de diferentes tipos de biomasa presentaron efectos estadísticos significativos sobre la longitud radicular en las plantas de *T. cacao* L.; para el caso del porcentaje de biocarbón y la interacción entre ambos factores, no se encontró diferencias estadísticas significativas; además, no se diferenciaron efectos entre los factores en estudio vs el testigo. Los datos obtenidos correspondientes a la longitud del sistema radicular fueron favorables debido a que estuvieron enmarcados dentro del intervalo considerado para estudios experimentales (Tabla 12).

Tabla 12. ANVA para la longitud radicular en *Theobroma cacao* L. sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón.

| Fuente de variación | SC | GL | CM | Fc | Valor P |
|-----------------------------|---------|----|---------|---------|----------------------|
| Entre grupos | 327,591 | 9 | 36,399 | 4,143 | 0,0008** |
| Tipo de biomasa (A) | 252,355 | 2 | 126,178 | 14,3632 | <0,0001** |
| Porcentaje de biocarbón (B) | 31,934 | 2 | 15,967 | 1,8176 | 0,1756 ^{ns} |
| Interacción A x B | 43,242 | 4 | 10,811 | 1,2306 | 0,3133 ^{ns} |
| Factores vs testigo | 0,060 | 1 | 0,060 | 0,004 | 0,9483 ^{ns} |
| Error experimental | 351,392 | 40 | 8,785 | | |
| Total | 678,983 | 49 | | | |

CV: 21,10%; **: altamente significativo.

Basándose en la prueba de comparación de medias de Tukey para los factores en estudio, se registró efectos principales en la longitud radicular al emplear los tipos de biomasa, siendo mucho mayor los efectos en la cascarilla del *C. arabica* (a₂) y *O. sativa* (a₃) con medias aritméticas de 15,71 y 15,75 cm respectivamente. En caso de la proporción de

biocarbón, no se reportó diferencias estadísticas significativas, de manera similar, en el contraste de los factores con el testigo hubo ausencia de diferencias estadísticas respecto a la variable mencionada, siendo numéricamente superior la media de los factores estudiados (Figura 16).

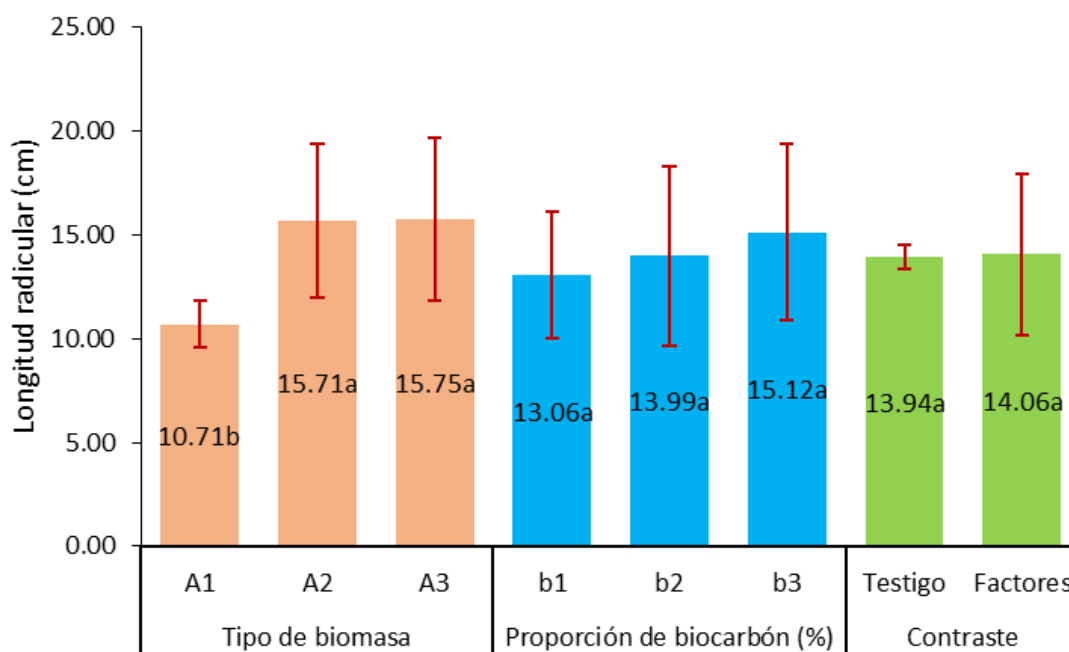


Figura 16. Efecto principal de los factores estudiados y el contraste con el testigo para la longitud radicular en *T. cacao*.

Avenza (2012) y Herrera et al. (2018) describen que el aporte de los distintos tipos de biocarbón no ha tenido como consecuencia un mayor desarrollo del sistema radicular en plantas de *Hordeum vulgare* (cebada) y *Capparis scabrida* (zapote) respectivamente. En el presente estudio la aplicación de biocarbón registró efectos principales en los diferentes tipos de biomasa, pero no se encontró efectos significativos en el contraste de los factores con el T₀ o testigo, encontrando similitudes al tratamiento control en cuanto a la longitud radicular de la planta de *T. cacao*.

4.2.5. Peso fresco por planta

Mediante el análisis de la varianza, se determinó que, utilizar diferentes tipos de biomasa presentaron efectos estadísticos significativos sobre el peso fresco en las plantas de *T. cacao*; en caso del factor denominado porcentaje de biocarbón así como la interacción de ambos factores considerados en el estudio no se encontraron diferencias estadísticas significativas; de manera contraria, se evidenció diferencias estadísticas significativas al

contrastar a los factores estudiados vs el testigo adicional. Los resultados para la variable peso fresco de las plantas del cacao presentaron comportamientos muy favorables por enmarcarse el coeficiente de variación en el intervalo considerado para experimentos (Tabla 13).

Tabla 13. ANVA para el peso fresco en *T. cacao* sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón.

| Fuente de variación | SC | GL | CM | Fc | Valor P |
|-----------------------------|--------|----|-------|--------|----------------------|
| Entre grupos | 26,538 | 9 | 2,949 | 2,883 | 0,0101* |
| Tipo de biomasa (A) | 16,196 | 2 | 8,098 | 7,9172 | 0,0013** |
| Porcentaje de biocarbón (B) | 1,783 | 2 | 0,891 | 0,8716 | 0,4261 ^{ns} |
| Interacción A x B | 3,097 | 4 | 0,774 | 0,7569 | 0,5595 ^{ns} |
| Factores vs testigo | 5,463 | 1 | 5,463 | 4,230 | 0,0452* |
| Error experimental | 40,914 | 40 | 1,023 | | |
| Total | 67,452 | 49 | | | |

CV: 17,32%; ns: no significativo; *: significativo; **: altamente significativo.

Se observó efectos principales sobre el peso fresco al utilizar los tipos de biomasa como la cascarilla del *C. arabica* (a₂) y *O. sativa* (a₃) con promedios de 6,22 y 6,51 g respectivamente; en caso de la proporción de biocarbón, no se registró diferencias estadísticas, pero es notorio que, el mayor promedio se observó al utilizar 8,0% de biocarbón (b₂). Respecto al contraste entre los factores en estudio con el testigo, hubo diferencias estadísticas, siendo mayor el promedio para los factores en estudio con 5,95 g por planta, mientras que en caso del testigo solamente se observó una media de 4,85 g (Figura 17).

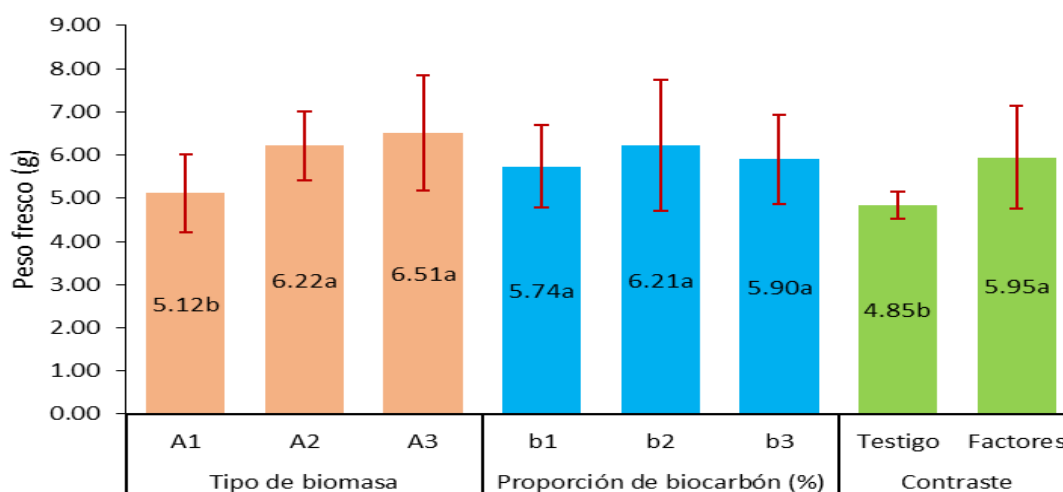


Figura 17. Efecto principal de los factores en estudio y el contraste con el testigo para el peso fresco de *T. cacao*.

4.2.6. Peso seco por planta

De acuerdo al análisis de la varianza, se demostró que los factores estudiados como el uso de diferentes tipos de biomasa no presentaron efectos estadísticos significativos sobre el peso seco en las plantas de *T. cacao*, de manera similar se comportó el uso del factor porcentaje de biocarbón al no evidenciar diferencias estadísticas; además, no se encontró interacción estadística significativa entre los niveles de ambos factores estudiados; por otra parte, al contrastar los efectos de los factores vs el testigo no hubo significancia estadística significativa. De acuerdo al valor registrado del coeficiente de variación (15,58%), los datos obtenidos para la variable peso seco estuvieron enmarcados dentro del intervalo considerado para investigaciones experimentales (Tabla 14).

Tabla 14. ANVA para el peso seco en *T. cacao* sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón.

| Fuente de variación | SC | GL | CM | Fc | Valor P |
|-----------------------------|-------|----|-------|--------|----------------------|
| Entre grupos | 0,391 | 9 | 0,043 | 1,048 | 0,4204 ^{ns} |
| Tipo de biomasa (A) | 0,159 | 2 | 0,079 | 1,9143 | 0,1607 ^{ns} |
| Porcentaje de biocarbón (B) | 0,170 | 2 | 0,085 | 2,0514 | 0,1419 ^{ns} |
| Interacción A x B | 0,055 | 4 | 0,014 | 0,3291 | 0,8568 ^{ns} |
| Factores vs testigo | 0,008 | 1 | 0,008 | 0,184 | 0,6700 ^{ns} |
| Error experimental | 1,657 | 40 | 0,041 | | |
| Total | 2,049 | 49 | | | |

CV: 15,58%; ns: no significativo.

No se registró efectos principales en el peso seco al utilizar los tipos de biomasa, con el cual se determina que, numéricamente resultó ser mucho mayor el promedio con el uso de cascarilla del *O. sativa* (a₃) con un valor de 1,39 g por planta; en caso de la proporción de biocarbón utilizado, el mayor promedio se observa al utilizar 8,0% de biocarbón (b₂) con una media aritmética de 136 g en peso seco; respecto al contraste realizado entre los factores con el testigo considerado, no se logró demostrar diferencias estadísticas significativas respecto a la variable peso seco de las plantas del cacao, siendo numéricamente superior el promedio de los dos factores considerados en el estudio con un valor de 1,31 g por planta (Figura 18).

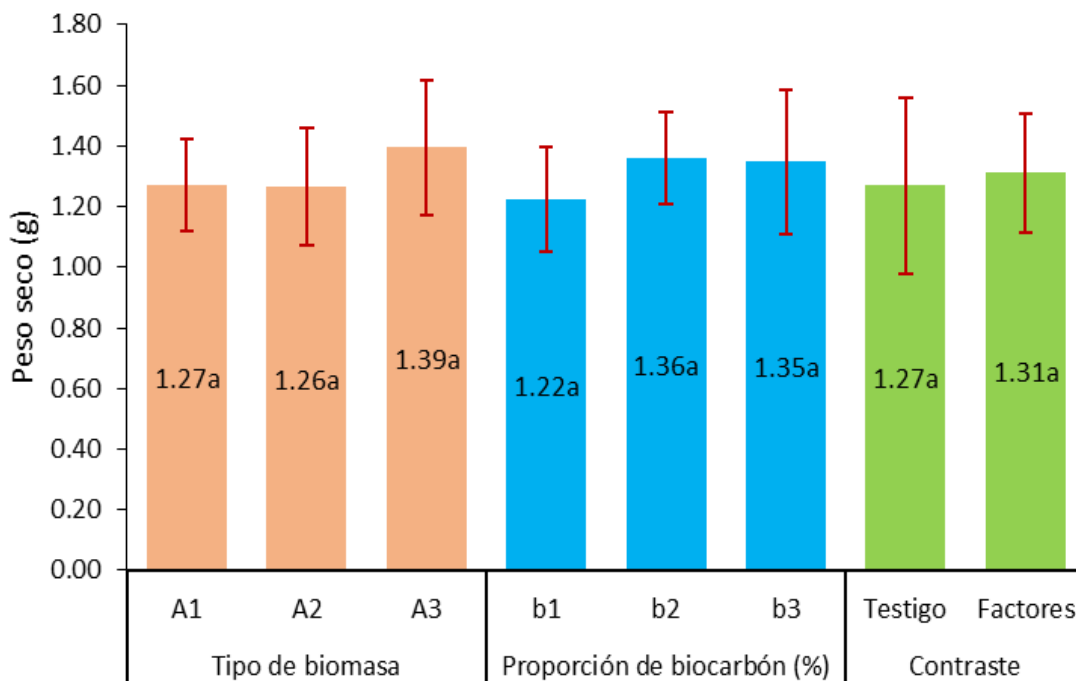


Figura 18. Efecto principal de los factores estudiados y el contraste con el testigo para el peso seco en *T. cacao*.

La aplicación de biocarbón solo registró efectos estadísticos significativos en la variable peso fresco de la planta y no en el peso seco. Resultados similares fueron descritos por Herrera et al. (2018), al encontrar efectos en el incremento de masa fresca pero no en el incremento de masa seca del *Capparis scabrida* (zapote), además se logró determinar diferencias significativas respecto a la dosis del biocarbón, encontrándose que el tratamiento con una dosis de 15% de biocarbón fue mejor que el testigo y que los tratamientos que contenían 30% de biocarbón.

4.3. Efecto del biocarbón sobre los niveles de cadmio en la planta de *Theobroma cacao*

De acuerdo al análisis de la varianza, utilizar diferentes tipos de biomasa presentan efectos estadísticos significativos sobre el contenido de cadmio en las plantas de *T. cacao*; para el caso del factor en estudio porcentaje de biocarbón, se evidenció diferencias estadísticas significativas sobre la variable ya indicada; además, se reporta interacción estadística entre los niveles de ambos factores en estudio y en caso del contraste entre los factores vs el testigo también hubo diferencias estadísticas significativas. De acuerdo al valor del coeficiente de variación, los datos obtenidos para la variable analizada se encuentra en el rango considerado para los estudios experimentales (Tabla 15).

Tabla 15. ANVA para los niveles de cadmio en *T. cacao* sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón.

| Fuente de variación | SC | GL | CM | Fc | Valor P |
|-----------------------------|-------|----|-------|---------|-----------|
| Entre grupos | 4,839 | 9 | 0,538 | 48,817 | <0,0001** |
| Tipo de biomasa (A) | 0,670 | 2 | 0,335 | 30,4068 | <0,0001** |
| Porcentaje de biocarbón (B) | 0,185 | 2 | 0,092 | 8,3963 | 0,0009** |
| Interacción A x B | 0,135 | 4 | 0,034 | 3,0650 | 0,0271* |
| Factores vs testigo | 3,850 | 1 | 3,850 | 129,173 | <0,0001** |
| Error experimental | 0,441 | 40 | 0,011 | | |
| Total | 5,280 | 49 | | | |

CV: 19,41%; *: significativo; **: altamente significativo.

Basándose en la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para los factores en estudio, se registró efectos principales sobre el contenido de cadmio entre los tejidos de las plantas de *T. cacao*, siendo mayor dichos efectos estadísticos en la cáscara de *T. cacao* (a₁) con una media de 0,28 ppm; en caso de la proporción de biocarbón, el mejor promedio se observa al utilizar solamente 8,0% y 10,0% de biocarbón (b₂ y b₃) con promedios aritméticos de 0,42 y 0,39 ppm respectivamente; respecto al contraste de los factores estudiados con el testigo, se observa superior valor de la media en los factores con un valor de 0,45 ppm en comparación a las plantas de cacao que no fueron tratados con biocarbón al presentar una media de 1,37 ppm, siendo estadísticamente diferentes dichos valores (Figura 19).

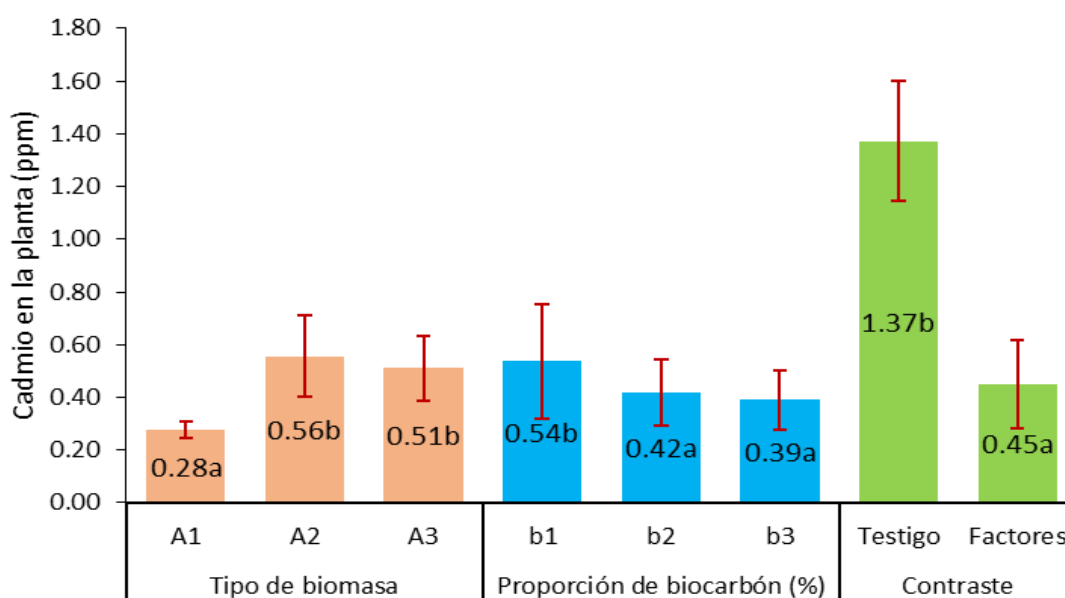


Figura 19. Efecto principal de los factores estudiados y el contraste con el testigo para el contenido de cadmio en *T. cacao*.

Analizando el efecto de los niveles del factor A en el factor B, se observa que al utilizar cáscara de *T. cacao* (a_1) en diferentes concentraciones de biocarbón generan efectos estadísticos significativos muy superiores en comparación al testigo para el contenido de cadmio en las plantas de *T. cacao*; en caso de la cascarilla de *C. Arabica*, el mayor efecto estadístico se observa al utilizar 8,0% y 10,0% de biocarbón (b_3) con promedios aritméticos de 0,45 y 0,47 ppm respectivamente, y para la cascarilla de *O. sativa* sobresalieron también la aplicación de 8,0% y 10,0% de biocarbón. Analizando los niveles del factor B en el factor A, se registró diferencias de efectos en el nivel b_1 y b_2 (6,0% y 8,0% de concentración). Los mejores efectos se observaron en las combinaciones generadas por cáscara de *T. cacao* en todo sus concentraciones de biocarbón: a_1b_1 , a_1b_2 y a_1b_3 (Tabla 16).

Tabla 16. Efecto simple para el nivel de cadmio en *T. cacao* sometidas al tipo de biomasa y proporción de biocarbón.

| Factores | Concentración de biocarbón | | | Testigo | Valor P |
|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------|
| | 6,00% | 8,00% | 10,00% | | |
| Tipo de biomasa <i>T. cacao</i> L. | 0,29 ^{a/a} | 0,28 ^{a/a} | 0,26 ^{a/a} | 1,37 ^{b/-} | <0,001** |
| <i>C. arabica</i> | 0,75 ^{b/b} | 0,45 ^{a/bc} | 0,47 ^{a/a} | 1,37 ^{c/-} | <0,001** |
| <i>O. sativa</i> | 0,57 ^{a/b} | 0,52 ^{a/b} | 0,44 ^{a/a} | 1,37 ^{b/-} | <0,001** |
| Testigo | 1,37 ^{-/c} | 1,37 ^{-/c} | 1,37 ^{-/b} | | |
| Valor P | <0,001** | <0,001** | <0,001** | | |

** : altamente significativo. Letras diferentes demuestran significancia estadística.

La concentración de cadmio en plantas de *T. cacao* demuestra que existe diferencia significativa en el uso de diferentes tipos de biomasa, siendo mayor los efectos en el biocarbón de la cascarilla de *T. cacao*. Al respecto estos efectos se relacionan con las características físicas y químicas del biocarbón, que dependen principalmente de las condiciones en las que son obtenidos y del tipo de materia prima; que son determinantes en la adsorción y retención de iones (Balta, 2019).

Park et al. (2011) demostraron que el biocarbón derivado de residuos verdes es eficaz para inmovilizar Cd a mayor dosis de aplicación, obteniendo un 67,2 % de reducción en la acumulación de Cd una dosis del 15% de biocarbón en brotes de *Brassica juncea* (mostaza india). Estos resultados son similares a al presente estudio, al presentarse diferencias

significativas en el contenido de Cd en plantas de *T. cacao* en cuanto a mayores dosis de aplicación de biocarbón.

4.4. Eficiencia de inmovilización de cadmio en el suelo

La aplicación de diferentes tipos de biomasa agrícola no presentaron efectos estadísticos significativos sobre la eficiencia de inmovilización del cadmio en el suelo; en caso del porcentaje de biocarbón se registró diferencias estadísticas significativas en la variable analizada y también se encontró interacción estadística significativa entre los factores estudiados; para el caso del contraste entre los factores vs el testigo se encontró diferencias estadísticas. Al observar el coeficiente de variación del 1,16%, se determina que los datos obtenidos respecto a la eficiencia de inmovilización fueron favorables al encontrarse dentro del intervalo de los estudios pertenecientes a los experimentos (Tabla 17).

Tabla 17. ANVA para la eficiencia de inmovilización de cadmio en suelos sometidos al tipo de biomasa y proporción de biocarbón.

| Fuente de variación | SC | GL | CM | Fc | Valor P |
|-----------------------------|----------|----|----------|----------|----------------------|
| Entre grupos | 8912,895 | 9 | 990,322 | 1076,900 | <0,0001** |
| Tipo de biomasa (A) | 1,497 | 2 | 0,749 | 0,8141 | 0,4502 ^{ns} |
| Porcentaje de biocarbón (B) | 14,683 | 2 | 7,342 | 7,9835 | 0,0012** |
| Interacción A x B | 25,182 | 4 | 6,295 | 6,8459 | 0,0003** |
| Factores vs testigo | 8871,533 | 1 | 8871,533 | 5449,143 | <0,0001** |
| Error experimental | 36,784 | 40 | 0,920 | | |
| Total | 8949,680 | 49 | | | |

CV: 1,16%; ns: no significativo; **: altamente significativo.

Utilizar diferentes tipos de biomasa no presentan efectos diferentes en la eficiencia de inmovilización del cadmio, mientras que al considerar la proporción de biocarbón, se reporta mayores efectos estadísticos al utilizar 8,0% de biocarbón (b2) con una media de 87,75%. Respecto al contraste realizado entre los factores considerados con el testigo establecido, se logró demostrar diferencias estadísticas significativas, siendo marcadamente superior la media de los factores con un valor de 86,78% respecto al 42,38% encontrado por el testigo lo cual ratifica la superioridad numérica y estadística (Figura 20).

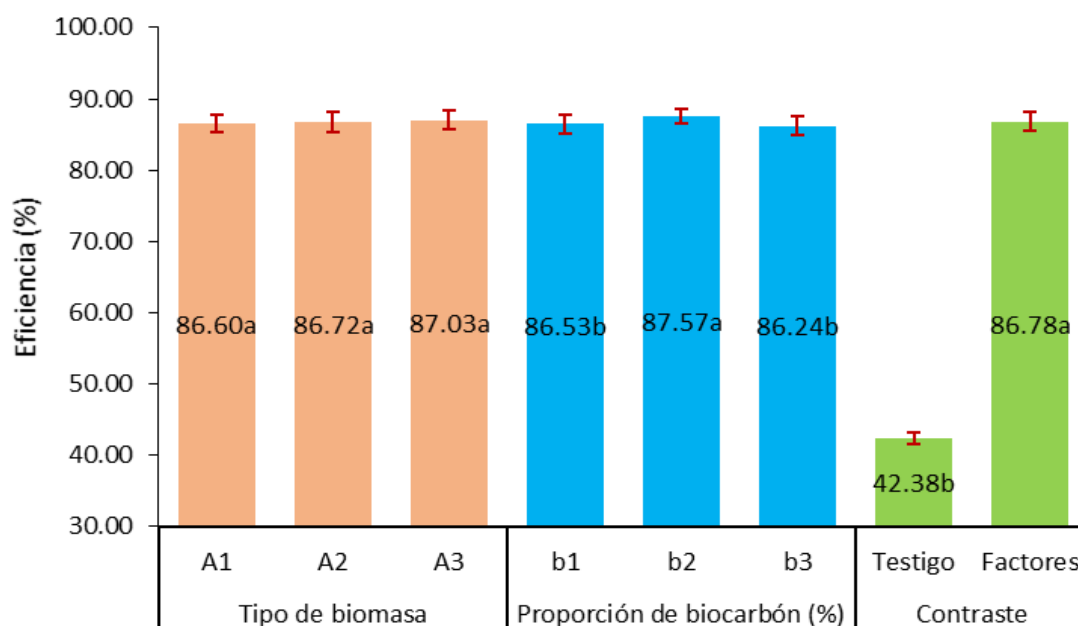


Figura 20. Efecto principal de los factores estudiados y el contraste con el testigo para la eficiencia de inmovilización de cadmio en el suelo.

Al analizar el efecto de los niveles del factor A en el factor B, se observa que utilizar cáscara de *T. cacao*. (a_1) en concentraciones de biocarbón del 10,0% generan mayor diferencias estadísticas sobre la eficiencia de inmovilización; para el caso de la cascarilla de *C. arabica*, sobresalieron todos las concentraciones de biocarbón respecto al testigo. Analizando los niveles del factor B en el factor A, se reporta que al utilizar el biocarbón a 6,0% y 8,0% sobresale la eficiencia de la cascarilla de *O. sativa*, mientras que al 10,0% tiene mejor expresión la cáscara de *T. cacao* L. La mayor eficiencia se observó en la combinación cascarilla de *O. sativa* al 8,0% de concentración (a_3b_2) con una media de 88,22% (Tabla 18).

Tabla 18. Efecto simple para la eficiencia de inmovilización de cadmio en suelos sometidos al tipo de biomasa y proporción de biocarbón.

| Factores | Concentración de biocarbón | | | Testigo | Valor P |
|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|----------|
| | 6,00% | 8,00% | 10,00% | | |
| <i>T. cacao</i> L. | 85,52 ^{b/b} | 86,78 ^{ab/b} | 87,50 ^{a/a} | 42,38 ^{c/-} | <0,001** |
| <i>C. arabica</i> | 86,63 ^{a/ab} | 87,72 ^{a/ab} | 85,79 ^{a/b} | 42,38 ^{b/-} | <0,001** |
| <i>O. sativa</i> | 87,44 ^{a/a} | 88,22^{a/a} | 85,44 ^{b/b} | 42,38 ^{c/-} | <0,001** |
| Testigo | 42,38 ^{-c} | 42,38 ^{-c} | 42,38 ^{-c} | | |
| Valor P | <0,001** | <0,001** | <0,001** | | |

** : altamente significativo. Letras diferentes demuestran significancia estadística.

Puga et al. (2015) demuestran que el biocarbón provocó una reducción lineal de los metales pesados disponibles en suelo, que correspondió una disminución del 54% en Cd a dosis de 5%, debido a la retención de metales en la superficie del biocarbón.

Cui et al. (2011) en su estudio de aplicación de biocarbón a partir de paja de trigo en suelos con altas concentraciones de Cd, observó una reducción del 40% de este elemento. En el presente estudio la aplicación de biocarbón no presentó efectos diferentes en la inmovilización de cadmio con respecto a los diferentes tipos de biomasa, pero hubo efectos significativos para la proporción de 8% de biocarbón, obteniendo una eficiencia de inmovilización de 88,22%.

V. CONCLUSIONES

1. El biocarbón obtenido a partir de la cascarilla de *O. sativa* y *C. arabica* presentó altos rendimientos de producción. Existe heterogeneidad en las propiedades fisicoquímicas, composición elemental y características microestructurales del biocarbón relacionado con la materia prima.
2. La aplicación de biocarbón tiene efectos favorables en el número de hojas, diámetro de tallo y peso fresco, el biocarbón de la cascarilla de *C. arabica* y *O. sativa*, que independientemente de la proporción agregada obtuvo un mejor desarrollo de la planta de *T. cacao*.
3. La aplicación de biocarbón al suelo disminuyó el contenido de Cd en las plantas de *T. cacao*, siendo el biocarbón derivado de la cascarilla de *T. cacao* en proporciones de 6%, 8% y 10% significativos en la disminución del contenido de Cd en la planta.
4. El biocarbón tiene el potencial de afectar significativamente el comportamiento del Cd en el suelo. La mayor eficiencia de inmovilización de cadmio en el suelo fue de 88.22 % en la combinación del biocarbón de la cascarilla de *O. sativa* a una dosis de 8,0%.

VI. PROPUESTA A FUTURO

1. Se sugiere incorporar mejoras en el diseño del horno pirolítico, que permita reducir el tiempo de producción, aumentar el rendimiento y evitar el uso innecesario de biomasa como combustible y reducir las emisiones significativas de humo.
2. Realizar estudios de producción de biocarbón que involucren el uso de otros tipos de biomasa o residuos de origen vegetal o animal, como alternativa para fomentar el aprovechamiento de residuos orgánicos y disminuir la cantidad de residuos generados en los sistemas agropecuarios.
3. Realizar estudios de la aplicación de biocarbón en campo de cultivo de *Teobroma cacao*, considerando periodos de evaluación mas largos, determinando si el biocarbón sigue interactuando con la fertilidad del suelo y su efecto sobre el rendimiento del cultivo.
4. Se recomienda realizar análisis fisicoquímicos del suelo después de la aplicación de las diferentes tipos y proporciones de biocarbón en cada tratamiento, con la finalidad de determinar el efecto del biocarbón en las propiedades fisicoquímicas del suelo.

VII. REFERENCIAS

- Akhtar, J., Saidina Amin, N. (2012). A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis. *Renew. Sustain. Energy Rev., Netherlands*, 16(7), 5101-5109.
- Al-Wabel, M., Usman, A., El-Naggar, A., Aly, A., Ibrahim, H., Elmagraghraby, S., Al-Omran, A. (2015). Conocarpus biocarbón as a soil amendment for reducing heavy metal availability and uptake by maize plants. *Saudi J Biol Sci, Arabia Saudita*, 22(4), 503-511.
- Antal, M., Gronli, M. (2003). The art, science, and technology of charcoal production. *Ind. Eng. Chem. Res, Estados Unidos*, 42(8), 1619-1640.
- ASTM. (1984). *Standard D1762-84; Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal*. <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D176284R95E1.htm>
- Avenza, D. (2012). *Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta*. Lic. Ciencias ambientales. Universidad de Barcelona.
- Awolumate, E.O. (1983). Chemical composition and potential uses of processing wastes from some Nigerian cash crops. *Turrialba, Costa Rica*, 33(4), 381-386.
- Balta, R. (2019). *El carbón activado y el biocarbón en la asimilación del cadmio por el tomate (Solanum lycopersicum L.) bajo el invernadero*. Tesis MSc Suelos. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 123 p.
- Barrueta, S. (2013). *Guía de métodos de detección y análisis de cadmio en cacao Theobroma cacao L.*: SlideShare. <https://es.slideshare.net/RIICCHPeru/guia-de-metodos-de-deteccion-y-analisis-de-cadmio-en-cacao>
- Belalcazar, S. (2013). *Evaluación del biocarbón derivado de cascarilla de O. sativa como potenciador del establecimiento y proliferación de bacterias en suelos no perturbados*. [Tesis Biología. Santiago de Cali, Colombia. Universidad ICESI]. 59 p.
- Bhatnagar, A., Hogland, W., Marques, M., Sillanpää, M. (2013). An overview of the modification methods of activated carbón for its water treatment applications. *CHEM ENG J., Netherlands*, 219, 499-511.

- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Gomez-Eyles, J., Harris, E., Robinson, B. y Sizmur, T. (2011). A review of biochars potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution, Reino Unido*, 159(12), 3269-3282.
- Badillo, J. (2008). Cadmio. Curso básico de toxicología ambiental. 2 ed. México, Limusa. p. 205-228.
- Brownsort, P. (2009). *Biomass pyrolysis processes: performance parameters and their influence on biocarbón system benefits*. [M. Sc. Thesis. UK. University of Edinburgh]. 93 p.
- Calzada, J. (1970). Métodos estadísticos para la investigación. Lima, Perú. 643 p.
- Carter, S., Shackley, S., Sohi, S., Suy, T.B., Haefele, S. (2013). The Impact of Biochar Application on Soil Properties and Plant Growth of Pot Grown Lettuce (*Lactuca sativa*) and Cabbage (*Brassica chinensis*). *Agron J., Switzerland*, 3(2), 404-418.
- Clemens, S., Antosiewicz, D., Ward, J., Schachtman, D., Schroeder, J. (1998). The plant cDNA LCT1 mediates the uptake of calcium and cadmium in yeast. *PNAS USA*, 95(20), 12043-12048.
- Condeña, E. (2017). *Recuperación de suelos contaminados con plomo mediante el uso de biocarbón de bagazo de caña de azúcar en el parque Chota del AA.HH Ramón Castilla – Callao 2017*. [Tesis Ing. Ambiental. Lima, Peru. Universidad Cesar Vallejo]. 90 p.
- Cui, H. J., Wang, M.K., Fu, M. L., Ci, E. (2011). Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice strawderived biochar. *J. Soils Sediments, Germany*, 11(7), 1135–1141.
- De La Cruz, L. (2018). *Eficiencia del biocarbón a partir de residuos de poda para inmovilizar plomo en el suelo a nivel laboratorio UCV, 2018*. [Tesis Ing. Ambiental. Lima, Perú. Universidad Cesar Vallejo].
- Diaz, L. (2017). *Remediación de suelos alterados por actividad de minería del carbón a cielo abierto, mediante aplicación de biocarbón procedente de residuos biomásicos de la palma de aceite en la zona carbonifera del departamento del Cesar*. [Tesis Doc. Ingeniería énfasis ambiental. Medellín, Colombia. Universidad de Antioquia].
- Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López, J., Collado, Campo, J., Valtierra, E., Etchevers J.

- (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana, México*, 34(3), 367-382.
- Escudero, C., Gabaldón, C., MarzaL, P., Villaescusa, I. (2008). Effect of EDTA on divalent metal adsorption onto grape stalk and exhausted coffee wastes. *J. Hazard. Mater., Netherlands*, 152(2), 476-85.
- Farkas, A., Erratico, C., Viganó, L. (2007). Assessment of the environmental significance of heavy metal pollution in surficial sediments of the river Po. *Chemosphere, Inglaterra*, 68(4), 761-768.
- Fellet, G., Marmiroli, M., Marchiol, L. (2014). Elements uptake by metal accumulator species grown on mine tailings amended with three types of biochar. *Sci. Total Environ., Reino Unido*. 468-469, 598–608.
- Garaycochea, A. (2020). *Remoción de la demanda química de oxígeno del agua residual del procesamiento del café mediante bioadsorbentes derivados de residuos agrícolas*. [Tesis Ing. Ambiental. Lima, Perú. Universidad Científica del Sur].
- García, O. (2002). *Efectos biológicos de campos magnéticos de muy baja frecuencia y radiofrecuencia en presencia de metales pesados: cadmio y mercurio*. [Tesis Doctor. Madrid, España. Universidad Complutense de Madrid].
- Gaskin, J. W., Steiner, C., Harris, K., Das, K.C., Bibens, B. (2007). Effect of low-temperature pyrolysis conditions. *ASABE, United States*, 51(6), 2061-2069.
- Glaser, B., Balashov, E., Haumaier, L., Guggenberger, G., Zech, W. (2000). Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon. *Org. Geochem, United Kingdom*, 31(7-8), 669-678.
- Graziani, L., Ortiz, J., Angulo. (2002). Características físicas del fruto de cacao tipos criollo, forastero y trinitario de la localidad de Cumboto, *Venezuela. Agron. trop., Venezuela*, 53(3), 325-342.
- Guerra, L. (2015). *Producción y caracterización de Biocarbón a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonia Peruana*. [Tesis Ing. Ambiental. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria la Molina].
- Hernández, Y., Rodríguez, P., Peña, M., Meriño, Y., y Cartaya, O. (2019). Toxicidad del Cadmio en las plantas y estrategias para disminuir sus efectos. Estudio de caso: El tomate. *Cultrop., 40(4):1-19*.

- Herrera, E., Feijoo, C., Alfaro, R., Solis, J., Gomez, M., Keiski, R., Cruz, G. (2018). Producción de biocarbón a partir de biomasa residual y su uso en la germinación y crecimiento en vivero de *Capparis scabrida* (Sapote). *Sci. Agropecu., Trujillo*, 9(4), 569-577.
- Holdridge, L. (1978). *Ecología basada en zonas de vida*. San José, Costa Rica, IICA. 216 p.
- IBI (International Biochar Initiative). (2013). *Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil*. IBI. <https://biochar-international.org/characterizationstandard>
- Isaura, J. (2011). *Capacidad de amortiguación de la contaminación por plomo y por cadmio en suelos de la comunidad de Madrid* [Tesis Doc. Madrid, España. Universidad Complutense de Madrid].
- Kookana, R.S., Sarmah, A.K., Van Zwieten, L., Krull, E., Singh B. (2011). Biochar application to soil: Agronomic and environmental benefits and unintended consequences. *Adv. Agron., San Diego, CA*, 112, 103-143.
- Lehmann, J., Gaunt, J. y Rondon, M. (2006). Biochar sequestration in terrestrial ecosystems - A review. *Mitg. Adapt. Strat. Glob. Change., Netherlands*. 11: 403-427.
- Lehmann, J., Joseph, S. (2009). *Biochar for Environmental Management: science and technology*. Eartscan.
- Lehmann J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota- a review". *Soil Biol. Biochem., United Kingdom*, 43, 1812-1836.
- Li, H., Liu, Y., Chen, Y., Wang, S., Wang, M., Xie, T., Wang, G. (2016). *Biochar amendment immobilizes lead in rice paddy soils and reduces its phytoavailability*: NCBI, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27530495>
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Neves, E. (2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J., United States*, 70(5), 1719-1730.
- Madeddu, D. (2005). *Estudio de la influencia del cadmio sobre el medioambiente y el organismo humano: perspectivas experimentales, epidemiológicas y morfofuncionales en el hombre y en los animales de experimentación* [Tesis Doctoral Universidad de Granada].

- Manya, J. J. (2012). Pyrolysis for biocarbón purposes: A review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environ. Sci. Technol*, 46, 7939-7954.
- Mcelligott, K., Page-Dumroese, D., Coleman, M. (2011). Bioenergy production systems and biochar application in forests: potential for renewable energy, soil enhancement, and carbon sequestration. Forest Service. https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_rn046.pdf
- Mclaughlin, H., Anderson, P., Shields, F., Reed, T. (2009). *All biocarbóns are not created equal, and how to tell them apart: Terra Petra*. <http://terrapreta.bioenergylists.org/files/All-Biochars--Version2--Oct2009.pdf>
- MINAM (Ministerio del Ambiente). (2014). *Guía para el muestreo de suelo*. MINAM, http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1.pdf
- Montoya, J. (2014). *Pirólisis rápida de biomasa*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/281976634_Pirólisis_rápida_de_biomasa
- Moreno, E., Manzano, R., Esteban, E., Peñalosa, J. (2010). The fate of arsenic in soils adjacent to an old mine site (Bustarviejo, Spain): mobility and transfer to native flora. *J. Soils Sediments, Germany*, 10(2), 301-312.
- Namakforoosh, M. (2005). Metodología de la investigación. Limusa.
- Nava, R., Méndez, A. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Arch Neurocién., Mexico*, 16(3), 140-147. <https://www.medigraphic.com/pdfs/arcneu/ane-2011/ane113f.pdf>
- Nguyen, T., Brown, R., Ball, W. (2004). An evaluation of thermal resistance as a measure of black carbon content in diesel soot, Wood char, and sediment. *Organic Geochemistry, Reino Unido*, 35(3), 217-234.
- Norvell, W., Wu, J., Hopkins, D., Welch, R. (2000). Association of cadmium in durum wheat grain with soil chlorine and chelateextractable soil cadmium. *Soil Sci Soc Am J., United States*, 64(6), 2162- 2168.
- Olmo, M. (2016). *Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal*. [Tesis Dr. Córdoba, España. Universidad de Cordoba].
- Ortiz, D., Ruscitti, T., Mccue, K., Ow, D (1995). Transport of metal-binding peptides by HMT1, a fission yeast ABC-type vacuolar membrane protein. *J. Biol. Chem., United*

- States*, 270(9), 4721-4728.
- Osorio, L., Tovar, A. y Fortoul, T. (1997). *Introducción a la toxicología ambiental*. Metepec.
- Park, J.H., Choppala, G.K., Bolan, N.S. & Chung, J.W. (2011). Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant Soil, Netherlands*, 348(1), 439-451.
- Park, S., Cheng, N., Pittman, J., Yoo, K., Park, J., Smith, R., Hirschi, K. (2005). Increased Calcium levels and prolonged shelf life in tomatoes expressing Arabidopsis H⁺/Ca²⁺ transporters. *J. Plant Physiol. Germany*, 139(39), 1194-1206.
- Powlson, D.S., Gregory, P.J., Whalley, W.R., Quinton, J.N., Hopkins, D.W., Whitmore, A.P., Hirsch, P.R., Goulding, K.W. (2011). Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services. *Food Policy*, 36(1), S72-S87.
- Prada, A., Cortes, C.E. (2010). La descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral. *Orinoquia, Colombia*, 14(1), 155-170.
- Prince, W., Kumar, S., Doberschütz, K., Subburam, V. (2002). Cadmium toxicity in-mulberry plants with special reference to the nutritional quality of leaves. *J. Biol. Chem., United States*, 25(4), 689-00.
- Puga, A. P., Abreu, C. A., Melo, L. C., Beesley, L. (2015). Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium. *J. Environ. Manage, United States*, 159(1), 86-93.
- Quinceno, D., Mosquera, M.Y. (2010). *Alternativas ecológicas para el uso de la cascarilla de arroz como combustible* [Tesis Ing. Mecanico, Universidad Autónoma del Occidente].
- Rodriguez, A. (2005). *Metodología de la investigación*. Scribd, <https://es.scribd.com/document/311168172/METODOLOGÍA-DE-LAINVESTIGACION-ERNESTO-A-RODRIGUEZ-MOGUEL-pdf>
- Rodríguez, S., Martínez, N., Romero, P., Sandalio, L. (2008). Toxicidad del cadmio en plantas. *Eco, Granada*, 17(3), 139-146.
- Romero, J. (2017). Eficiencia en la Inmovilización de Plomo en el Suelo Mediante la Aplicación de Cantidades de Biocarbón en el Distrito San Mateo, Lima. [Tesis Ing. Ambiental, Universidad Cesar Vallejo].
- San Miguel, G., Gutiérrez, F. (2015). Tecnologías para el uso y transformación de biomasa

energética. Mundi Prensa.

- Sohi, S.P., Krull, E., Lopez-Capel, E., Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. In: L.S. Donald (Ed.). *Adv. Agron., San Diego, CA, 105*, 47-82.
- Subero, N. (2013). Evaluación de las fracciones de fósforo y del contenido de cadmio en suelos ácidos fertilizados con fosfatos por largos periodos y su absorción por el arroz. Dr. Ciencias Agrícolas. Macaray, Venezuela. Universidad Central de Venezuela.
- Tamayo, C., Muñoz, M. (2020). *Estudio de biochar obtenido a partir de cáscara de cacao, como mejorador del suelo en un cultivo de frejol (Phaseolus vulgaris)* [Tesis Ing. Química, Universidad Central de Ecuador].
- Thomas, G. (1996). *Methods of soil analysis; Chemical Methods*. United States of América, Madison, Wis.
- Uchimiya, M., Klaso, K., Forter, C., Lima, I. (2011). Influence of soil properties on heavy metal sequestration by biocarbón amendment: 2. Copper desorption isotherms. *Chemosphere, England, 82(10)*, 1438-1447.
- Westerman, R. (1990). Soil testing and plant analysis. Madison, WI, USA. Soil Science Society of America.
- Yu, X., Ying, G., Kookana, R. (2006). Sorption and desorption behaviors of diuron in soils amended with charcoal. *J. Agric. Food Chem., EE.UU, 54(22)*, 8545-8550. http://en.jaas.ac.cn/upload_linkfile/day_141229/201412291312429678.pdf
- Zheng, J.Y., Stewart, C.E., Cotrufo, M.F. (2012). Biochar and nitrogen fertilizer alters soil nitrogen dynamics and greenhouse gas fluxes from two temperate soils. *J. Environ. Qual., United Sates, 41(5)*, 1361-1370.

ANEXOS

Tabla 19. Rendimientos en la producción del biocarbón.

| Biomasa | Lote de Producción | Biomasa (Kg) | Biocarbón (Kg) | Rendimiento (%) |
|---------------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|
| Cascara de <i>T. cacao</i> | Lote 1 | 19,3 | 1,746 | 9 |
| | Lote 2 | 20 | 2,075 | 10,4 |
| Cascarilla de <i>C. arabica</i> | Lote 1 | 5 | 2,182 | 43,6 |
| | Lote 2 | 5,1 | 2,474 | 48,5 |
| Cascarilla de <i>O. sativa</i> | Lote 1 | 5,2 | 2,18 | 41,9 |
| | Lote 2 | 5,5 | 2,582 | 46,9 |

Tabla 20. Descriptivos para la altura de *T. cacao* sometidas al tipo de biomasa y concentración de biocarbón.

| Tipo de biomasa | Concentración de biocarbón | Media (cm) | N | CV (%) |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------|----------|---------------|
| Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 24,70 | 5 | 8,25 |
| | 8% | 23,74 | 5 | 11,10 |
| | 10% | 24,58 | 5 | 15,97 |
| Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 27,68 | 5 | 14,45 |
| | 8% | 28,16 | 5 | 16,30 |
| | 10% | 26,04 | 5 | 11,74 |
| Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 25,48 | 5 | 7,91 |
| | 8% | 29,42 | 5 | 10,29 |
| | 10% | 25,80 | 5 | 6,81 |
| Contraste | Testigo | 24,48 | 5 | 2,03 |
| | Factores | 26,18 | 45 | 12,84 |

CV: Coeficiente de variación.

Tabla 21. Descriptivos para la cantidad de hojas en *T. cacao*.

| Tipo de biomasa | Concentración de biocarbón | Media | N | CV (%) |
|---------------------------------|----------------------------|-------|----|--------|
| Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 4,20 | 5 | 19,92 |
| | 8% | 4,00 | 5 | 25,00 |
| | 10% | 3,80 | 5 | 11,77 |
| Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 4,60 | 5 | 19,44 |
| | 8% | 4,40 | 5 | 20,33 |
| | 10% | 5,60 | 5 | 9,78 |
| Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 4,40 | 5 | 12,45 |
| | 8% | 5,20 | 5 | 21,07 |
| | 10% | 4,20 | 5 | 19,92 |
| Contraste | Testigo | 3,60 | 5 | 15,21 |
| | Factores | 4,49 | 45 | 20,50 |

Tabla 22. Descriptivos para el diámetro del tallo en *T. cacao*.

| Tipo de biomasa | Concentración de biocarbón | Media (mm) | N | CV (%) |
|---------------------------------|----------------------------|------------|----|--------|
| Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 3,42 | 5 | 6,92 |
| | 8% | 3,27 | 5 | 12,03 |
| | 10% | 3,17 | 5 | 8,51 |
| Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 3,49 | 5 | 6,01 |
| | 8% | 3,64 | 5 | 8,50 |
| | 10% | 3,51 | 5 | 5,37 |
| Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 3,61 | 5 | 4,30 |
| | 8% | 3,61 | 5 | 8,23 |
| | 10% | 3,54 | 5 | 9,51 |
| Contraste | Testigo | 3,17 | 5 | 7,74 |
| | Factores | 3,47 | 45 | 8,46 |

Tabla 23. Descriptivos para la longitud radicular en *T. cacao*.

| Tipo de biomasa | Concentración de biocarbón | Media (cm) | N | CV (%) |
|---------------------------------|----------------------------|------------|----|--------|
| Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 11,14 | 5 | 11,15 |
| | 8% | 10,56 | 5 | 8,51 |
| | 10% | 10,42 | 5 | 12,97 |
| Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 14,92 | 5 | 28,45 |
| | 8% | 15,48 | 5 | 29,88 |
| | 10% | 16,72 | 5 | 14,80 |
| Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 13,12 | 5 | 14,86 |
| | 8% | 15,92 | 5 | 29,30 |
| | 10% | 18,22 | 5 | 19,22 |
| Contraste | Testigo | 13,94 | 5 | 4,01 |
| | Factores | 14,06 | 45 | 27,92 |

Tabla 24. Descriptivos para el peso fresco en *T. cacao*.

| Tipo de biomasa | Concentración de biocarbón | Media (g) | N | CV (%) |
|---------------------------------|----------------------------|-----------|----|--------|
| Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 5,30 | 5 | 20,42 |
| | 8% | 5,06 | 5 | 23,62 |
| | 10% | 4,99 | 5 | 8,76 |
| Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 6,01 | 5 | 9,21 |
| | 8% | 6,69 | 5 | 16,31 |
| | 10% | 5,95 | 5 | 9,06 |
| Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 5,89 | 5 | 19,81 |
| | 8% | 6,89 | 5 | 24,78 |
| | 10% | 6,75 | 5 | 16,70 |
| Contraste | Testigo | 4,85 | 5 | 6,49 |
| | Factores | 5,95 | 45 | 19,89 |

Tabla 25. Descriptivos para el peso seco en *T. cacao*.

| Tipo de biomasa | Concentración de biocarbón | Media (g) | N | CV (%) |
|---------------------------------|----------------------------|-----------|----|--------|
| Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 1,19 | 5 | 7,08 |
| | 8% | 1,35 | 5 | 8,17 |
| | 10% | 1,28 | 5 | 16,84 |
| Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 1,21 | 5 | 13,80 |
| | 8% | 1,32 | 5 | 16,04 |
| | 10% | 1,26 | 5 | 17,92 |
| Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 1,27 | 5 | 20,54 |
| | 8% | 1,42 | 5 | 8,78 |
| | 10% | 1,50 | 5 | 15,93 |
| Contraste | Testigo | 1,27 | 5 | 22,92 |
| | Factores | 1,31 | 45 | 15,01 |

Tabla 26. Descriptivos para los niveles de cadmio en plantas de *T. cacao*.

| Tipo de biomasa | Concentración de biocarbón | Media (ppm) | N | CV (%) |
|---------------------------------|----------------------------|-------------|----|--------|
| Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 0,29 | 5 | 8,79 |
| | 8% | 0,28 | 5 | 14,44 |
| | 10% | 0,26 | 5 | 3,53 |
| Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 0,75 | 5 | 10,96 |
| | 8% | 0,45 | 5 | 12,84 |
| | 10% | 0,47 | 5 | 17,58 |
| Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 0,57 | 5 | 28,17 |
| | 8% | 0,52 | 5 | 21,17 |
| | 10% | 0,44 | 5 | 10,46 |
| Contraste | Testigo | 1,37 | 5 | 16,40 |
| | Factores | 0,45 | 45 | 37,28 |

Tabla 27. Descriptivos para la eficiencia de inmovilización de cadmio en suelos.

| Tipo de biomasa | Concentración de biocarbón | Media (%) | N | CV (%) |
|---------------------------------|-----------------------------------|------------------|----------|---------------|
| Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 85,52 | 5 | 0,69 |
| | 8% | 86,78 | 5 | 1,17 |
| | 10% | 87,50 | 5 | 1,37 |
| Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 86,63 | 5 | 1,96 |
| | 8% | 87,72 | 5 | 0,94 |
| | 10% | 85,79 | 5 | 1,38 |
| Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 87,44 | 5 | 0,83 |
| | 8% | 88,22 | 5 | 0,53 |
| | 10% | 85,44 | 5 | 0,39 |
| Contraste | Testigo | 42,38 | 5 | 1,75 |
| | Factores | 86,78 | 45 | 1,51 |

CV: Coeficiente de variación.

Tabla 28. Matriz de datos del cadmio disponible y eficiencia de absorción.

| Tratamiento | Tipo de biomasa | Porcentaje biocarbón | Cd_planta | Cd_disponible | Eficiencia (%) |
|-------------|----------------------------|----------------------|-----------|---------------|----------------|
| 0 | | | 1,675 | 0,56 | 42,42 |
| 0 | | | 1,455 | 0,554 | 43,04 |
| 0 | | | 1,290 | 0,565 | 41,91 |
| 0 | | | 1,385 | 0,57 | 41,39 |
| 0 | | | 1,060 | 0,553 | 43,14 |
| 1 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 0,325 | 0,142 | 85,40 |
| 1 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 0,270 | 0,149 | 84,68 |
| 1 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 0,265 | 0,133 | 86,33 |
| 1 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 0,310 | 0,14 | 85,61 |
| 1 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 0,300 | 0,14 | 85,61 |
| 2 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 8% | 0,275 | 0,137 | 85,91 |
| 2 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 8% | 0,350 | 0,128 | 86,84 |
| 2 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 8% | 0,240 | 0,134 | 86,22 |
| 2 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 8% | 0,270 | 0,112 | 88,48 |
| 2 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 8% | 0,275 | 0,132 | 86,43 |

| Tratamiento | Tipo de biomasa | Porcentaje biocarbón | Cd_planta | Cd_disponible | Eficiencia (%) |
|--------------------|---------------------------------|-----------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|
| 3 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 10% | 0,27 | 0,113 | 88,38 |
| 3 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 10% | 0,245 | 0,133 | 86,33 |
| 3 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 10% | 0,260 | 0,125 | 87,15 |
| 3 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 10% | 0,255 | 0,106 | 89,10 |
| 3 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 10% | 0,255 | 0,131 | 86,53 |
| 4 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 0,735 | 0,104 | 89,31 |
| 4 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 0,730 | 0,143 | 85,30 |
| 4 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 0,815 | 0,123 | 87,35 |
| 4 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 0,625 | 0,141 | 85,50 |
| 4 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 0,830 | 0,139 | 85,71 |
| 5 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 8% | 0,470 | 0,111 | 88,59 |
| 5 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 8% | 0,480 | 0,128 | 86,84 |
| 5 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 8% | 0,460 | 0,112 | 88,48 |
| 5 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 8% | 0,350 | 0,119 | 87,76 |
| 5 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 8% | 0,495 | 0,127 | 86,94 |
| 6 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 10% | 0,450 | 0,14 | 85,61 |
| 6 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 10% | 0,465 | 0,127 | 86,94 |

| Tratamiento | Tipo de biomasa | Porcentaje biocarbón | Cd_planta | Cd_disponible | Eficiencia (%) |
|-------------|---------------------------------|----------------------|-----------|---------------|----------------|
| 6 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 10% | 0,410 | 0,143 | 85,30 |
| 6 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 10% | 0,615 | 0,127 | 86,94 |
| 6 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 10% | 0,420 | 0,154 | 84,17 |
| 7 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 0,690 | 0,124 | 87,25 |
| 7 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 0,780 | 0,114 | 88,28 |
| 7 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 0,405 | 0,116 | 88,07 |
| 7 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 0,440 | 0,126 | 87,05 |
| 7 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 0,540 | 0,131 | 86,53 |
| 8 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 8% | 0,630 | 0,118 | 87,87 |
| 8 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 8% | 0,605 | 0,11 | 88,69 |
| 8 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 8% | 0,555 | 0,11 | 88,69 |
| 8 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 8% | 0,410 | 0,12 | 87,66 |
| 8 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 8% | 0,395 | 0,115 | 88,18 |
| 9 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 10% | 0,455 | 0,144 | 85,19 |
| 9 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 10% | 0,480 | 0,14 | 85,61 |
| 9 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 10% | 0,410 | 0,145 | 85,09 |
| 9 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 10% | 0,479 | 0,137 | 85,91 |
| 9 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 10% | 0,375 | 0,142 | 85,40 |

CC: Cáscara de *T. cacao*.

Tabla 29. Matriz de datos de la características de las plantas de *Theobroma cacao*.

| Tratamiento | Tipo de biomasa | Porcentaje biocarbón | Altura | Radícula | Diámetro | Hojas | Peso fresco | Peso seco |
|-------------|----------------------------|----------------------|--------|----------|----------|-------|-------------|-----------|
| 0 | | | 24,8 | 14,7 | 3,59 | 4 | 5,1584 | 1,4207 |
| 0 | | | 24,1 | 13,3 | 3,09 | 3 | 4,9030 | 1,4655 |
| 0 | | | 24,2 | 13,5 | 3,18 | 4 | 4,4310 | 0,9663 |
| 0 | | | 24,1 | 14,2 | 2,99 | 4 | 4,6260 | 0,9426 |
| 0 | | | 25,2 | 14 | 3,01 | 3 | 5,1189 | 1,5493 |
| 1 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 25,8 | 12,7 | 3,27 | 4 | 5,9990 | 1,0799 |
| 1 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 22,2 | 12 | 3,74 | 3 | 5,8885 | 1,1818 |
| 1 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 24,4 | 9,5 | 3,13 | 5 | 3,8287 | 1,2753 |
| 1 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 27,5 | 10,8 | 3,54 | 4 | 6,3066 | 1,2739 |
| 1 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 6% | 23,6 | 10,7 | 3,41 | 5 | 4,4788 | 1,1459 |
| 2 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 8% | 24,2 | 9,9 | 3,5 | 5 | 5,9590 | 1,5378 |
| 2 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 8% | 25,5 | 10,9 | 3,2 | 4 | 5,9170 | 1,2909 |
| 2 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 8% | 21 | 9,5 | 3,1 | 3 | 3,5279 | 1,3289 |
| 2 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 8% | 21,1 | 10,7 | 2,75 | 3 | 3,9981 | 1,3042 |
| 2 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 8% | 26,9 | 11,8 | 3,78 | 5 | 5,8931 | 1,2655 |
| 3 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 10% | 21,8 | 8,8 | 3,07 | 4 | 4,7578 | 1,5310 |

| Tratamiento | Tipo de biomasa | Porcentaje biocarbón | Altura | Radícula | Diámetro | Hojas | Peso fresco | Peso seco |
|-------------|---------------------------------|----------------------|--------|----------|----------|-------|-------------|-----------|
| 3 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 10% | 20,1 | 9,7 | 2,89 | 4 | 4,4559 | 0,9351 |
| 3 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 10% | 27,1 | 10,3 | 3,08 | 4 | 5,5420 | 1,3089 |
| 3 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 10% | 24,1 | 10,9 | 3,61 | 3 | 4,8928 | 1,3368 |
| 3 | Cáscara de <i>T. cacao</i> | 10% | 29,8 | 12,4 | 3,18 | 4 | 5,3256 | 1,2931 |
| 4 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 30,1 | 10,6 | 3,65 | 5 | 6,0923 | 1,1459 |
| 4 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 30 | 17,2 | 3,26 | 4 | 6,3953 | 1,2843 |
| 4 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 31 | 10,1 | 3,58 | 4 | 5,1141 | 0,9528 |
| 4 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 21,5 | 17,5 | 3,26 | 4 | 5,9326 | 1,3219 |
| 4 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 6% | 25,8 | 19,2 | 3,68 | 6 | 6,5230 | 1,3650 |
| 5 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 8% | 31,9 | 19,7 | 3,79 | 3 | 8,3251 | 1,4726 |
| 5 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 8% | 24,5 | 13,4 | 4,1 | 4 | 6,1996 | 1,1147 |
| 5 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 8% | 22,5 | 18,7 | 3,34 | 5 | 6,9678 | 1,4600 |
| 5 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 8% | 33,1 | 8,4 | 3,4 | 5 | 5,3603 | 1,0560 |
| 5 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 8% | 28,8 | 17,2 | 3,59 | 5 | 6,6125 | 1,4726 |
| 6 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 10% | 31,2 | 19,8 | 3,72 | 5 | 5,2558 | 1,0517 |
| 6 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 10% | 26 | 13,9 | 3,23 | 6 | 6,4795 | 1,4279 |
| 6 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 10% | 25,1 | 15,5 | 3,46 | 5 | 5,8968 | 1,3156 |

| Tratamiento | Tipo de biomasa | Porcentaje biocarbón | Altura | Radícula | Diámetro | Hojas | Peso fresco | Peso seco |
|-------------|---------------------------------|----------------------|--------|----------|----------|-------|-------------|-----------|
| 6 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 10% | 23,2 | 15,6 | 3,64 | 6 | 5,6202 | 1,0088 |
| 6 | Cascarilla de <i>C. arabica</i> | 10% | 24,7 | 18,8 | 3,5 | 6 | 6,4867 | 1,5204 |
| 7 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 22,8 | 14,5 | 3,45 | 5 | 6,7875 | 1,3828 |
| 7 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 26,6 | 14,7 | 3,62 | 5 | 4,2352 | 0,8477 |
| 7 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 28 | 11,3 | 3,67 | 4 | 5,8501 | 1,2409 |
| 7 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 25,7 | 14,4 | 3,49 | 4 | 5,4126 | 1,3128 |
| 7 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 6% | 24,3 | 10,7 | 3,84 | 4 | 7,1863 | 1,5475 |
| 8 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 8% | 30,1 | 16 | 4,06 | 6 | 9,6521 | 1,5995 |
| 8 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 8% | 27,2 | 15,3 | 3,48 | 6 | 6,6148 | 1,4062 |
| 8 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 8% | 29,8 | 15,4 | 3,73 | 6 | 7,1455 | 1,3963 |
| 8 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 8% | 33,9 | 23 | 3,48 | 4 | 5,8074 | 1,2507 |
| 8 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 8% | 26,1 | 9,9 | 3,29 | 4 | 5,2401 | 1,4392 |
| 9 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 10% | 28,7 | 22,1 | 3,77 | 4 | 8,2665 | 1,8861 |
| 9 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 10% | 24 | 20,9 | 3,97 | 4 | 6,5518 | 1,3389 |
| 9 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 10% | 25,7 | 17 | 3,33 | 5 | 5,1526 | 1,3095 |
| 9 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 10% | 25 | 17,9 | 3,49 | 3 | 7,1647 | 1,5676 |
| 9 | Cascarilla de <i>O. sativa</i> | 10% | 25,6 | 13,2 | 3,13 | 5 | 6,6159 | 1,3904 |

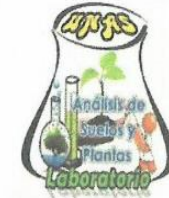


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

Carretera Central Km1.21 - Tingo María - CELULAR 941531359

Facultad de Agronomía - Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología

analisisdesuelosunas@hotmail.com



ANÁLISIS DE SUELOS

| SOLICITANTE: | | | SILVA GUERRERO CHRISTYE | | | | | PROCEDENCIA: | | | | | PICURUYACU - CASTILLO GRANDE | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|---------------------|-------------------------|---------|------|---------|------|--------------|------|------|--------|------|------------------------------|------|------|------|-----|----|------|--------|------|------|
| N° | COD. LAB. | DATOS DE LA MUESTRA | ANÁLISIS MECÁNICO | | | | pH | M.O. | N | P | K | CIC | CAMBIABLES Cmol(+)/kg | | | | | | CICe | % | % | % |
| | | | Arena | Arcilla | Limo | Textura | | | | | | | 1:1 | % | % | ppm | ppm | Ca | | | | |
| | | CULTIVO | % | % | % | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | S0699 | CACAO | 32 | 21 | 47 | Franco | 5.65 | 4.21 | 0.21 | 8.97 | 265.88 | 8.81 | 4.89 | 3.20 | 0.57 | 0.15 | -- | -- | -- | 100.00 | 0.00 | 0.00 |

MUESTREO POR EL SOLICITANTE

TINGO MARIA, 25 DE JUNIO 2019

RECIBO N° 0.582389



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LAB. ANÁLISIS DE SUELOS

Ing. Luis C. Mansilla Minaya
JEFE



Figura 21. Análisis de suelos.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

TINGO MARIA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



ANALISIS

SOLICITANTE : Silva Guerrero, Christye Marjorie
INVESTIGACION: Efecto del biocarbón obtenido a partir de biomasa residual agrícola en la inmovilización de cadmio en el suelo en fase de laboratorio.

DEPARTAMENTO : Huanuco
PROVINCIA : Leoncio Prado
DISTRITO : Castillo Grande

| N° | CODIGO | DATOS DE LA MUESTRA | | | | Cd disp. | Cd Total |
|----|-----------|---------------------|------------|---------|-------------|----------|----------|
| | | Muestra | sector | Ref. | Profundidad | mg/L | mg/L |
| 1 | ICP 00184 | Suelo | Picuruyacu | --- | --- | 0.9726 | 2.0752 |
| 2 | ICP 00185 | Cacao | Picuruyacu | Siembra | --- | --- | 0.36135 |

Equipo: ICP OES /HORIBA-Ultima expert
Metodo: Digestion acida/acido nitrico-perclorico
Recibo N°: 0583602

Fecha: 10/07/2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACION
Elizabeth Ordoñez Gomez
Dra. Elizabeth Ordoñez Gomez
DIRECTORA

Miguel Sánchez Rodríguez
Ing. Sánchez Rodríguez Miguel
ESPECIALISTA AREA ICP OES

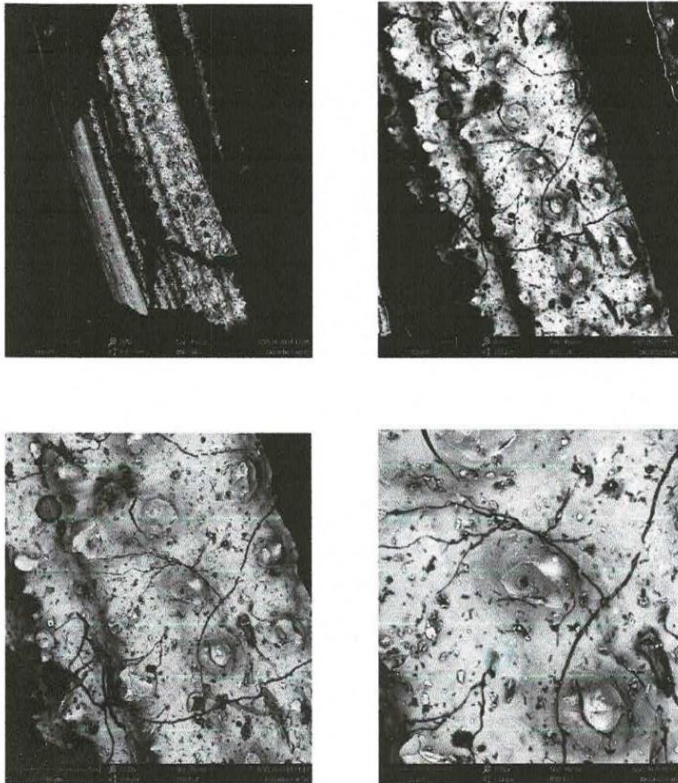
Figura 22. Contenido de cadmio en muestra de suelo y granos de cacao.



RESULTADOS DE ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

Análisis: Microfotografías electrónicas, análisis elemental y reconstrucción 3D
Muestras: Biocarbón de cascarilla de cacao, café y arroz.
Solicitante: Christye Marjorie Silva Guerrero
Analista: Ing. Darlym Reategui Díaz

Microfotografías biocarbón cascarilla de arroz:



Microfotografías biocarbón cascarilla de café:

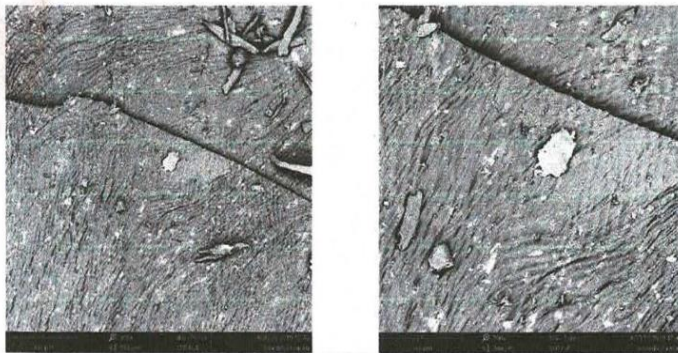
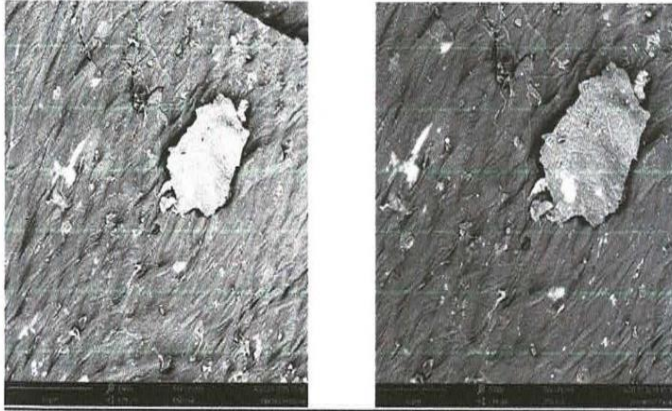


Figura 23. Análisis con microfotografías electrónicas en muestras de biocarbón de cascarilla de arroz y café.



Microfotografías cascarilla de cacao:

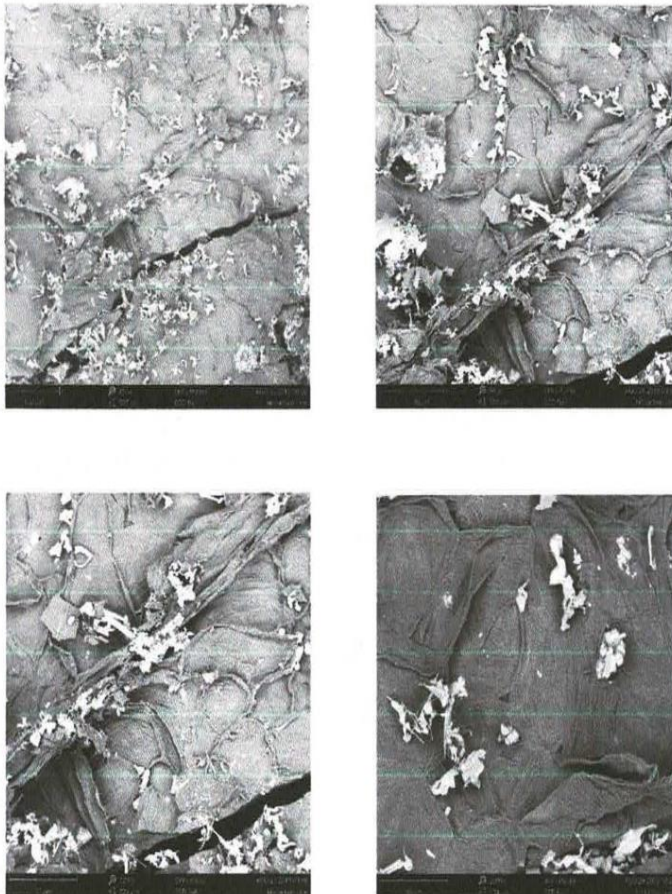
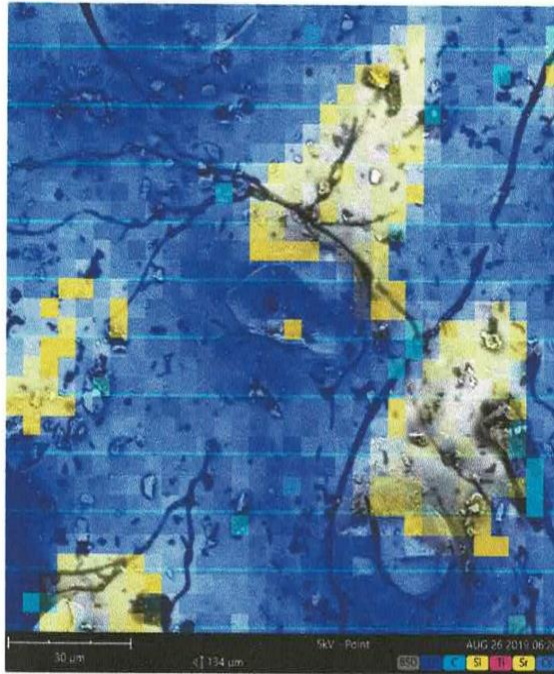


Figura 24. Análisis con microfotografías electrónicas en muestra de biocarbón en cascarillas de cacao.

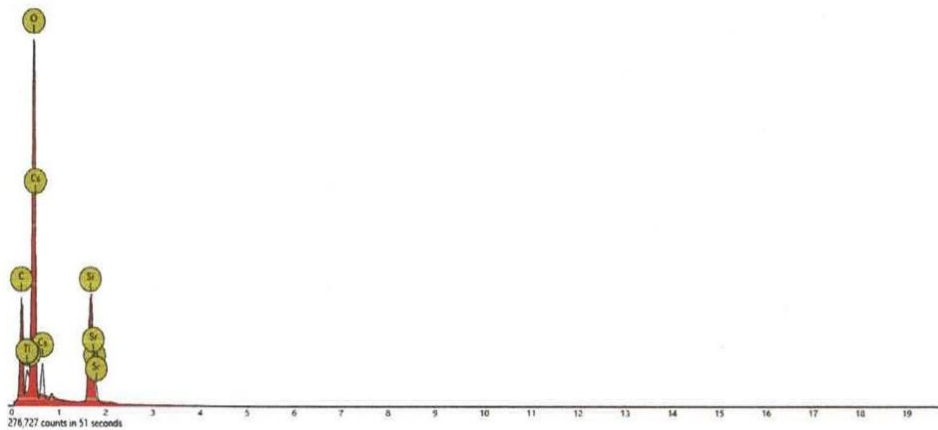


Análisis elemental biocarbón de cascarilla de arroz:



| Element Number | Element Symbol | Element Name | Atomic Conc. | Weight Conc. |
|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| 8 | O | Oxygen | 46.41 | 32.63 |
| 6 | C | Carbon | 26.86 | 14.18 |
| 14 | Si | Silicon | 14.77 | 18.23 |
| 22 | Ti | Titanium | 7.19 | 15.12 |
| 38 | Sr | Strontium | 4.05 | 15.60 |
| 55 | Cs | Caesium | 0.73 | 4.26 |

FOV: 134 μm, Mode: 5kV - Point, Detector: BSD Full, Time: AUG 26 2019 06:20



Disabled elements: B

Figura 25. Análisis elemental en muestra de biocarbón de cascarillas de arroz.



Análisis elemental biocarbón cascarilla de café:



| Element Number | Element Symbol | Element Name | Atomic Conc. | Weight Conc. |
|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| 6 | C | Carbon | 83.82 | 79.54 |
| 8 | O | Oxygen | 16.18 | 20.46 |

FOV: 224 µm, Mode: 5kV - Point, Detector: BSD Full, Time: AUG 16 2019 06:22



Figura 26. Análisis elemental en muestra de biocarbón de cascarillas de café.

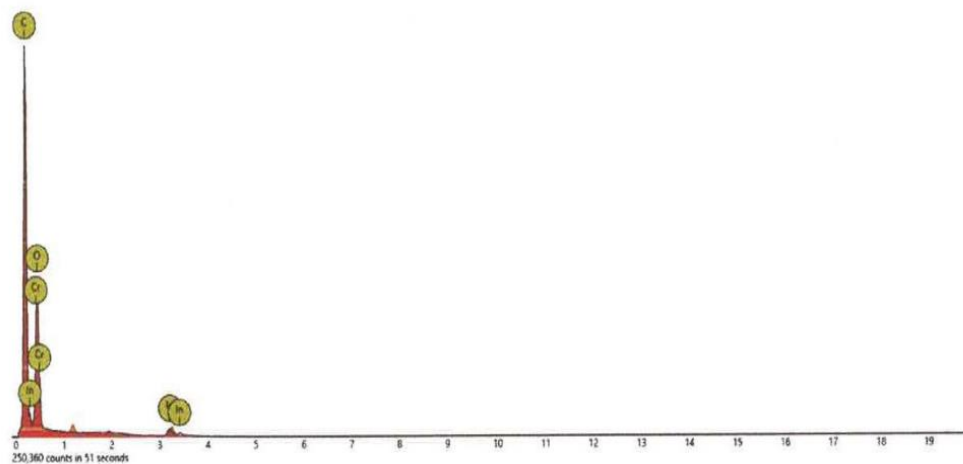


Análisis elemental biocarbón cascarilla de cacao:



| Element Number | Element Symbol | Element Name | Atomic Conc. | Weight Conc. |
|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| 6 | C | Carbon | 56.75 | 22.41 |
| 8 | O | Oxygen | 21.18 | 11.14 |
| 49 | In | Indium | 13.90 | 52.49 |
| 24 | Cr | Chromium | 8.16 | 13.95 |

FOV: 234 μm, Mode: 5kV - Point, Detector: BSD Full, Time: AUG 16 2019 05:50



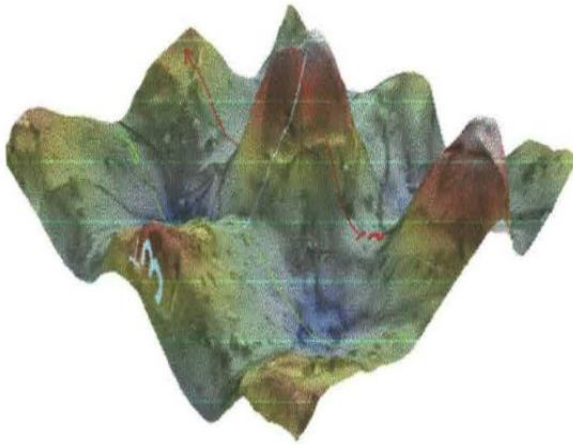
Disabled elements: B

Figura 27. Análisis elemental en muestra de biocarbón de cascarillas de cacao.



Reconstrucción 3D biocarbón cascarilla de arroz:

Overview



Field of view: 134.26 μm
 λs : 964 nm λc : 186.32 μm
 Sa : 16.99 μm

Roughness profiles

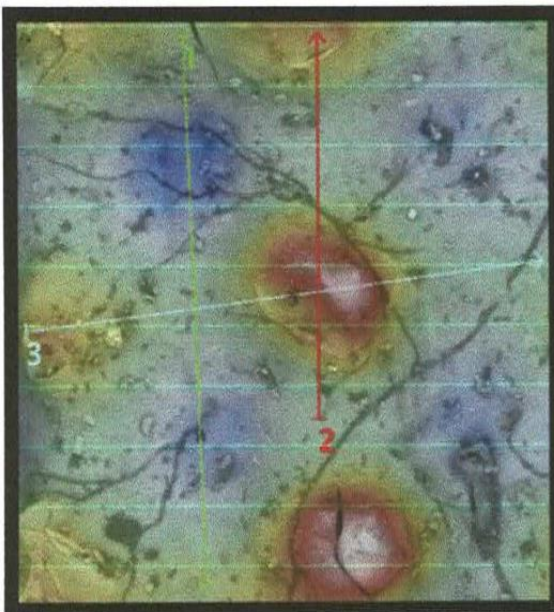
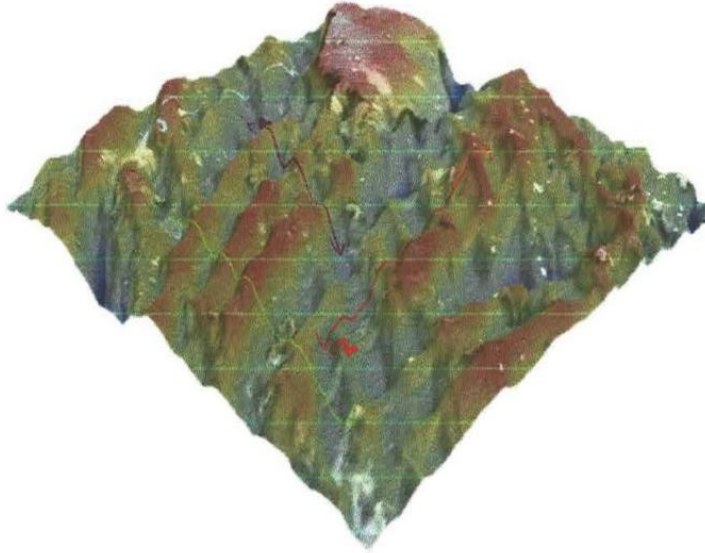


Figura 28. Análisis de reconstrucción 3D del biocarbón cascarilla de arroz.



Reconstrucción 3D biocarbón cascarilla de café:

Overview



Field of view: 134.30 μm
 λ_s : 964 nm λ_c : 186.32 μm
 S_a : 4.83 μm

Roughness profiles

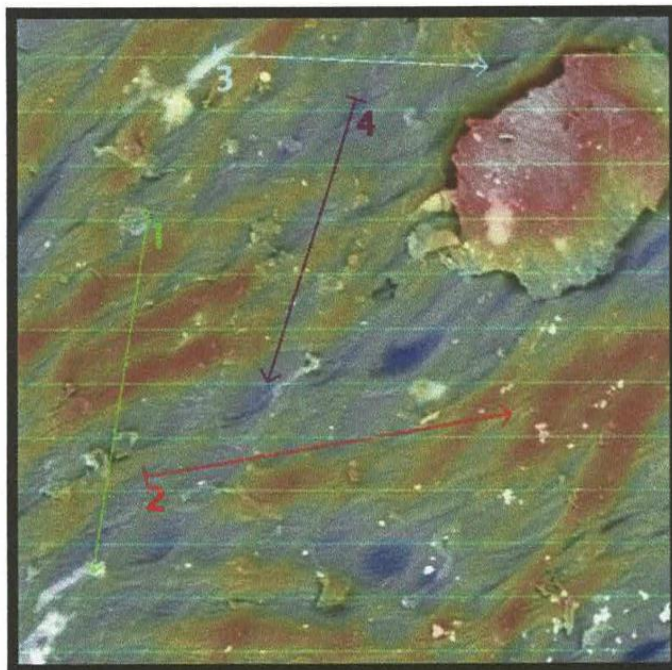


Figura 29. Análisis de reconstrucción 3D del biocarbón cascarilla de café.



Reconstrucción 3D biocarbón cascarilla de cacao:

Overview



Field of view: 134.25 μm
 λ_s : 964 nm λ_c : 186.32 μm
Sa: 7.18 μm

Roughness profiles

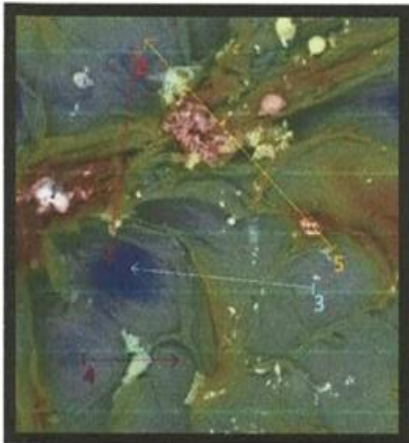


Figura 30. Análisis de reconstrucción 3D del biocarbón cascarilla de cacao.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

TINGO MARIA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



ANÁLISIS

SOLICITANTE Silva Guerrero, Christye Marjorie
INVESTIGACIÓN Efecto del biocarbon obtenido a partir de biomasa residual agrícola en la inmovilización de cadmio en el suelo en fase de laboratorio.

DEPARTAMENTO : Huanuco
PROVINCIA : Leoncio Prado
DISTRITO : Rupa Rupa

| N° | CODIGO | DATOS DE LA MUESTRA | | | Cd total |
|----|----------|---------------------|-------------|------------|----------|
| | | Muestra | Tratamiento | Repetición | mg/Kg |
| 1 | ICP 0284 | Plantula de cacao | T0 | R1 | 1.675 |
| 2 | ICP 0285 | Plantula de cacao | T0 | R2 | 1.455 |
| 3 | ICP 0286 | Plantula de cacao | T0 | R3 | 1.290 |
| 4 | ICP 0287 | Plantula de cacao | T0 | R4 | 1.385 |
| 5 | ICP 0288 | Plantula de cacao | T0 | R5 | 1.060 |
| 6 | ICP 0289 | Plantula de cacao | T1 | R1 | 0.325 |
| 7 | ICP 0290 | Plantula de cacao | T1 | R2 | 0.270 |
| 8 | ICP 0291 | Plantula de cacao | T1 | R3 | 0.265 |
| 9 | ICP 0292 | Plantula de cacao | T1 | R4 | 0.310 |
| 10 | ICP 0293 | Plantula de cacao | T1 | R5 | 0.300 |

Equipo: ICP OES /HORIBA-Ultima expert

Nota: Muestras digeridas por el solicitante

Recibo N° 0598095

| N° | CODIGO | DATOS DE LA MUESTRA | | | Cd total |
|----|----------|---------------------|-------------|------------|----------|
| | | Muestra | Tratamiento | Repetición | mg/Kg |
| 11 | ICP 0294 | Plantula de cacao | T2 | R1 | 0.275 |
| 12 | ICP 0295 | Plantula de cacao | T2 | R2 | 0.350 |
| 13 | ICP 0296 | Plantula de cacao | T2 | R3 | 0.240 |
| 14 | ICP 0297 | Plantula de cacao | T2 | R4 | 0.270 |
| 15 | ICP 0298 | Plantula de cacao | T2 | R5 | 0.275 |
| 16 | ICP 0299 | Plantula de cacao | T3 | R1 | 0.270 |
| 17 | ICP 0300 | Plantula de cacao | T3 | R2 | 0.245 |
| 18 | ICP 0301 | Plantula de cacao | T3 | R3 | 0.260 |
| 19 | ICP 0302 | Plantula de cacao | T3 | R4 | 0.255 |
| 20 | ICP 0303 | Plantula de cacao | T3 | R5 | 0.255 |

Fecha: 22/10/2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN
Dr. Elizabeth Ordoñez Guzmán
DIRECTORA

Miguel Sánchez Rodríguez
ING. Sánchez Rodríguez Miguel
SPECIALISTA AREA ICP OES

Figura 31. Contenido de cadmio total (mg/kg) en plantulas de cacao desde el tratamiento T₀ – T₃.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

TINGO MARIA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



ANÁLISIS

SOLICITANTE Silva Guerrero, Christye Marjorie
INVESTIGACIÓN Efecto del biocarbon obtenido a partir de biomasa residual agrícola en la inmovilización de cadmio en el suelo en fase de laboratorio.

DEPARTAMENTO : Huanuco
PROVINCIA : Leoncio Prado
DISTRITO : Rupa Rupa

| N° | CODIGO | DATOS DE LA MUESTRA | | | Cd total |
|----|----------|---------------------|-------------|------------|----------|
| | | Muestra | Tratamiento | Repetición | mg/Kg |
| 21 | ICP 0304 | Plantula de cacao | T4 | R1 | 0.735 |
| 22 | ICP 0305 | Plantula de cacao | T4 | R2 | 0.730 |
| 23 | ICP 0306 | Plantula de cacao | T4 | R3 | 0.815 |
| 24 | ICP 0307 | Plantula de cacao | T4 | R4 | 0.625 |
| 25 | ICP 0308 | Plantula de cacao | T4 | R5 | 0.830 |
| 26 | ICP 0309 | Plantula de cacao | T5 | R1 | 0.470 |
| 27 | ICP 0310 | Plantula de cacao | T5 | R2 | 0.480 |
| 28 | ICP 0311 | Plantula de cacao | T5 | R3 | 0.460 |
| 29 | ICP 0312 | Plantula de cacao | T5 | R4 | 0.350 |
| 30 | ICP 0313 | Plantula de cacao | T5 | R5 | 0.495 |

Equipo: ICP OES /HORIBA-Ultima expert

Nota: Muestras digeridas por el solicitante

Recibo N° 0598095

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN
Reduep
Dra. Elizabeth Ordoñez Gomez
DIRECTORA

| N° | CODIGO | DATOS DE LA MUESTRA | | | Cd total |
|----|----------|---------------------|-------------|------------|----------|
| | | Muestra | Tratamiento | Repetición | mg/Kg |
| 31 | ICP 0314 | Plantula de cacao | T6 | R1 | 0.450 |
| 32 | ICP 0315 | Plantula de cacao | T6 | R2 | 0.465 |
| 33 | ICP 0316 | Plantula de cacao | T6 | R3 | 0.410 |
| 34 | ICP 0317 | Plantula de cacao | T6 | R4 | 0.615 |
| 35 | ICP 0318 | Plantula de cacao | T6 | R5 | 0.420 |
| 36 | ICP 0319 | Plantula de cacao | T7 | R1 | 0.690 |
| 37 | ICP 0320 | Plantula de cacao | T7 | R2 | 0.780 |
| 38 | ICP 0321 | Plantula de cacao | T7 | R3 | 0.405 |
| 39 | ICP 0322 | Plantula de cacao | T7 | R4 | 0.440 |
| 40 | ICP 0323 | Plantula de cacao | T7 | R5 | 0.540 |

Fecha: 22/10/2019

ASR
Ing. Sánchez Rodríguez Miguel
ESPECIALISTA AREA ICP OES

Figura 32. Contenido de cadmio total (mg/kg) en plantulas de cacao desde el tratamiento T₄ – T₇.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

TINGO MARIA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



ANALISIS

SOLICITANTE Silva Guerrero, Christye Marjorie
INVESTIGACIÓN Efecto del biocarbon obtenido a partir de biomasa residual agrícola en la inmovilización de cadmio en el suelo en fase de laboratorio.

DEPARTAMENTO : Huanuco
PROVINCIA : Leoncio Prado
DISTRITO : Rupa Rupa

| N° | CODIGO | DATOS DE LA MUESTRA | | | Cd disponible |
|----|----------|---------------------|-------------|------------|---------------|
| | | Muestra | Tratamiento | Repetición | mg/Kg |
| 41 | ICP 0374 | Suelo | T8 | R1 | 0.118 |
| 42 | ICP 0375 | Suelo | T8 | R2 | 0.110 |
| 43 | ICP 0376 | Suelo | T8 | R3 | 0.110 |
| 44 | ICP 0377 | Suelo | T8 | R4 | 0.120 |
| 45 | ICP 0378 | Suelo | T8 | R5 | 0.115 |
| 46 | ICP 0379 | Suelo | T9 | R1 | 0.144 |
| 47 | ICP 0380 | Suelo | T9 | R2 | 0.140 |
| 48 | ICP 0381 | Suelo | T9 | R3 | 0.145 |
| 49 | ICP 0382 | Suelo | T9 | R4 | 0.137 |
| 50 | ICP 0383 | Suelo | T9 | R5 | 0.142 |

Equipo: ICP OES /HORIBA-Ultima expert

Nota: Muestras digeridas por el solicitante

Recibo N° 0598095

Fecha: 22/10/2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN
Dra. Elizabeth Ordoñez Gomez
DIRECTORA

Ing. Sánchez Rodríguez Miguel
ESPECIALISTA AREA ICP OES

Figura 33. Contenido de cadmio disponible (mg/kg) en muestras de suelo desde el tratamiento T₈ – T₉.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

TINGO MARIA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



ANÁLISIS

SOLICITANTE Silva Guerrero, Christye Marjorie
INVESTIGACIÓN Efecto del biocarbon obtenido a partir de biomasa residual agrícola en la inmovilización de cadmio en el suelo en fase de laboratorio.

DEPARTAMENTO : Huanuco
PROVINCIA : Leoncio Prado
DISTRITO : Rupa Rupa

| N° | CODIGO | DATOS DE LA MUESTRA | | | Cd disponible |
|----|----------|---------------------|-------------|------------|---------------|
| | | Muestra | Tratamiento | Repetición | mg/Kg |
| 1 | ICP 0334 | Suelo | T0 | R1 | 0.560 |
| 2 | ICP 0335 | Suelo | T0 | R2 | 0.554 |
| 3 | ICP 0336 | Suelo | T0 | R3 | 0.565 |
| 4 | ICP 0337 | Suelo | T0 | R4 | 0.570 |
| 5 | ICP 0338 | Suelo | T0 | R5 | 0.553 |
| 6 | ICP 0339 | Suelo | T1 | R1 | 0.142 |
| 7 | ICP 0340 | Suelo | T1 | R2 | 0.149 |
| 8 | ICP 0341 | Suelo | T1 | R3 | 0.133 |
| 9 | ICP 0342 | Suelo | T1 | R4 | 0.140 |
| 10 | ICP 0343 | Suelo | T1 | R5 | 0.140 |

| N° | CODIGO | DATOS DE LA MUESTRA | | | Cd disponible |
|----|----------|---------------------|-------------|------------|---------------|
| | | Muestra | Tratamiento | Repetición | mg/Kg |
| 11 | ICP 0344 | Suelo | T2 | R1 | 0.137 |
| 12 | ICP 0345 | Suelo | T2 | R2 | 0.128 |
| 13 | ICP 0346 | Suelo | T2 | R3 | 0.134 |
| 14 | ICP 0347 | Suelo | T2 | R4 | 0.112 |
| 15 | ICP 0348 | Suelo | T2 | R5 | 0.132 |
| 16 | ICP 0349 | Suelo | T3 | R1 | 0.113 |
| 17 | ICP 0350 | Suelo | T3 | R2 | 0.133 |
| 18 | ICP 0351 | Suelo | T3 | R3 | 0.125 |
| 19 | ICP 0352 | Suelo | T3 | R4 | 0.106 |
| 20 | ICP 0353 | Suelo | T3 | R5 | 0.131 |

Equipo: ICP OES /HORIBA-Ultima expert

Nota: Muestras digeridas por el solicitante

Recibo N° 0598095

Fecha: 22/10/2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN
Dr. Elisabeth Ordoñez Gomez
DIRECTORA

Ing. Sánchez Rodríguez Miguel
ESPECIALISTA AREA ICP OES

Figura 34. Contenido de cadmio disponible (mg/kg) en muestras de suelo desde el tratamiento T₀ – T₃.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

TINGO MARIA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



ANÁLISIS

SOLICITANTE Silva Guerrero, Christye Marjorie
INVESTIGACIÓN Efecto del biocarbon obtenido a partir de biomasa residual agrícola en la inmovilización de cadmio en el suelo en fase de laboratorio.

DEPARTAMENTO : Huanuco
PROVINCIA : Leoncio Prado
DISTRITO : Rupa Rupa

| N° | CODIGO | DATOS DE LA MUESTRA | | | Cd disponible |
|----|----------|---------------------|-------------|------------|---------------|
| | | Muestra | Tratamiento | Repetición | mg/Kg |
| 21 | ICP 0354 | Suelo | T4 | R1 | 0.104 |
| 22 | ICP 0355 | Suelo | T4 | R2 | 0.143 |
| 23 | ICP 0356 | Suelo | T4 | R3 | 0.123 |
| 24 | ICP 0357 | Suelo | T4 | R4 | 0.141 |
| 25 | ICP 0358 | Suelo | T4 | R5 | 0.139 |
| 26 | ICP 0359 | Suelo | T5 | R1 | 0.111 |
| 27 | ICP 0360 | Suelo | T5 | R2 | 0.128 |
| 28 | ICP 0361 | Suelo | T5 | R3 | 0.112 |
| 29 | ICP 0362 | Suelo | T5 | R4 | 0.119 |
| 30 | ICP 0363 | Suelo | T5 | R5 | 0.127 |

| N° | CODIGO | DATOS DE LA MUESTRA | | | Cd disponible |
|----|----------|---------------------|-------------|------------|---------------|
| | | Muestra | Tratamiento | Repetición | mg/Kg |
| 31 | ICP 0364 | Suelo | T6 | R1 | 0.140 |
| 32 | ICP 0365 | Suelo | T6 | R2 | 0.127 |
| 33 | ICP 0366 | Suelo | T6 | R3 | 0.143 |
| 34 | ICP 0367 | Suelo | T6 | R4 | 0.127 |
| 35 | ICP 0368 | Suelo | T6 | R5 | 0.154 |
| 36 | ICP 0369 | Suelo | T7 | R1 | 0.124 |
| 37 | ICP 0370 | Suelo | T7 | R2 | 0.114 |
| 38 | ICP 0371 | Suelo | T7 | R3 | 0.116 |
| 39 | ICP 0372 | Suelo | T7 | R4 | 0.126 |
| 40 | ICP 0373 | Suelo | T7 | R5 | 0.131 |

Equipo: ICP OES /HORIBA-Ultima expert

Nota: Muestras digeridas por el solicitante

Recibo N° 0598095

Fecha: 22/10/2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN
Escy
Dra. Elisabeth Ordoñez Gomez
DIRECTORA

Miguel
Ing. Sánchez Rodríguez Miguel
ESPECIALISTA AREA ICP OES

Figura 35. Contenido de cadmio disponible (mg/kg) en muestras de suelo desde el tratamiento T₄ – T₇.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

TINGO MARIA
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN



ANALISIS

SOLICITANTE Silva Guerrero, Christye Marjorie
INVESTIGACIÓN Efecto del biocarbon obtenido a partir de biomasa residual agrícola en la inmovilización de cadmio en el suelo en fase de laboratorio.

DEPARTAMENTO : Huanuco
PROVINCIA : Leoncio Prado
DISTRITO : Rupa Rupa

| N° | CODIGO | DATOS DE LA MUESTRA | | | Cd disponible |
|----|----------|---------------------|-------------|------------|---------------|
| | | Muestra | Tratamiento | Repetición | mg/Kg |
| 41 | ICP 0374 | Suelo | T8 | R1 | 0.118 |
| 42 | ICP 0375 | Suelo | T8 | R2 | 0.110 |
| 43 | ICP 0376 | Suelo | T8 | R3 | 0.110 |
| 44 | ICP 0377 | Suelo | T8 | R4 | 0.120 |
| 45 | ICP 0378 | Suelo | T8 | R5 | 0.115 |
| 46 | ICP 0379 | Suelo | T9 | R1 | 0.144 |
| 47 | ICP 0380 | Suelo | T9 | R2 | 0.140 |
| 48 | ICP 0381 | Suelo | T9 | R3 | 0.145 |
| 49 | ICP 0382 | Suelo | T9 | R4 | 0.137 |
| 50 | ICP 0383 | Suelo | T9 | R5 | 0.142 |

Equipo: ICP OES /HORIBA-Ultima expert

Nota: Muestras digeridas por el solicitante

Recibo N° 0598095

Fecha: 22/10/2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
LABORATORIO CENTRAL DE INVESTIGACIÓN
Pecca
Dra. Elisabeth Ordoñez Gomez
DIRECTORA

Ing. Sánchez Rodríguez Miguel
ESPECIALISTA AREA ICP OES

Figura 36. Contenido de cadmio disponible (mg/kg) en muestras de suelo desde el tratamiento T₈ – T₉.



Figura 37. Horno pirolítico elaborado para la producción del biocarbón.



Figura 38. Acodicionamiento con leña y ramas al interior del horno pirolítico.



Figura 39. Colocación de la cascarilla del *C. arabica* en la cámara interna de horno pirolítico.



Figura 40. Inicio de la llama al interior de horno pirolítico utilizado en el estudio.



Figura 41. Cierre del horno pirólítico e inicio de la pirólisis lenta.



Figura 42. Medición de la temperatura durante el proceso de pirólisis.



Figura 43. Biocarbón resultante del proceso de pirólisis por un tiempo de 12 horas.



Figura 44. Biocarbón obtenido a partir de la biomasa de la mazorca de cacao.



Figura 45. Biocarbón obtenido a partir de la biomasa de la cascarilla de *O. sativa*.



Figura 46. Biocarbón obtenido a partir de la biomasa de la cascarilla de *C. arabica*.



Figura 47. Biocarbón obtenido a partir de la biomasa residual molida para la aplicación al suelo.



Figura 48. Análisis del biocarbón producido a partir de la biomasa residual agrícola.



Figura 49. Determinación del contenido de humedad en muestras de biocarbón.



Figura 50. Muestras de biocarbón en el mufla para determinación del porcentaje de ceniza.



Figura 51. Determinación del pH de los diferentes tipos de biocarbón.



Figura 52. Muestreo de suelo en el Sector Picuruyacu – Castillo Grande.



Figura 53. Pregerminado de las semillas de *Theobroma cacao* L, "cacao".



Figura 54. Preparación de la mezcla biocarbón-suelo en porcentaje de 6%, 8% y 10%.



Figura 55. Colocación de las semillas de *Theobroma cacao* L, en los maceteros de polietileno.



Figura 56. Plantas de *Theobroma cacao* L, a un mes después de la germinación.



Figura 57. Plantas de *Theobroma cacao* L, a los dos meses después de la germinación.



Figura 58. Medicion del diametro de tallo en las plantas de *Theobroma cacao* L.



Figura 59. Medicion de la altura en las plantas de *Theobroma cacao* L.



Figura 60. Medicion de la longitud radicular en las plantas de *Theobroma cacao* L.



Figura 61. Plantas de *Theobroma cacao* L, en la estufa para determinación de peso seco.



Figura 62. Muestra de suelos para análisis de cadmio.



Figura 63. Digestion por ácido nítrico-perclórico para determinación de niveles de cadmio total.

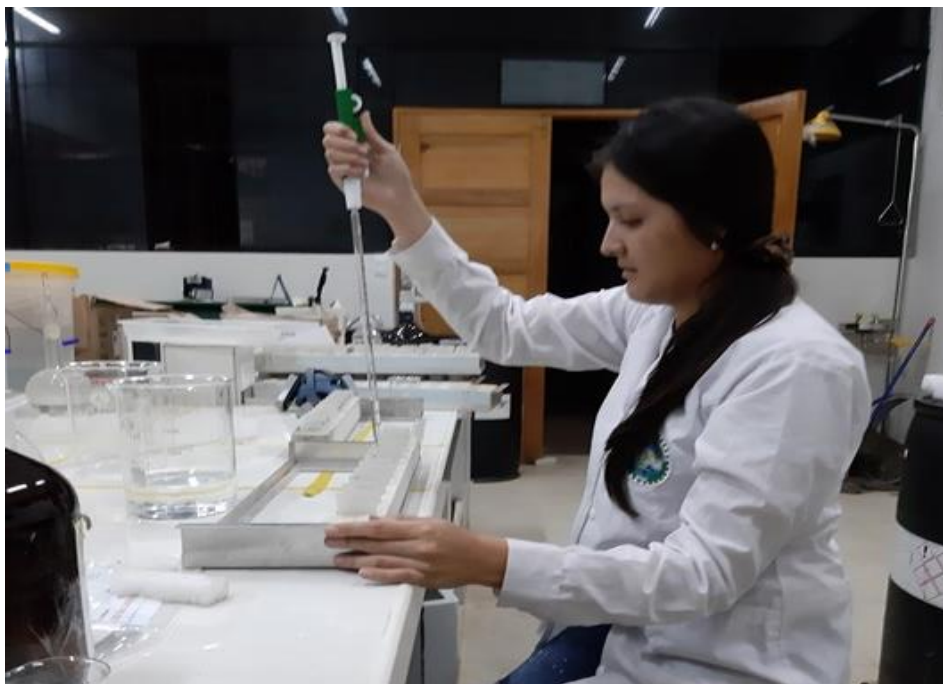


Figura 64. Aplicacion de extractante EDTA para determinación de cadmio disponible en suelo.