

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS

ESPECIALIDAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL



“Producción y caracterización de Biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonía Peruana”

Presentado por:

Patricia Amelia Guerra Laura

Tesis para optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

LIMA - PERÚ

2015

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos infinitos a mi mentor y consejero, el Dr. Julio Alegre Orihuela, por su guía, confianza y apoyo incondicional. A los jefes de las instituciones que financiaron y facilitaron mi investigación, a los Ing. Luis Arévalo y Enrique Arévalo, directores del Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (IIAP) y del Instituto de Cultivos Tropicales (ICT), respectivamente; instituciones dedicadas a la investigación para el desarrollo y uso sostenible de la diversidad biológica en la región amazónica.

A mis queridos padres y hermano, por su grandeza e inspiración para motivarme y seguir siempre adelante en toda meta trazada.

A los miembros de mi jurado de tesis; a la Dr. María Manta, al Ing. Lawrence Quipuzco y a la Quim. Mariflor Cesaré, por su comprensión, presteza y apoyo.

Así también, a todas aquellas personas que me apoyaron de todas las maneras posibles en las que se puede apoyar a una joven investigadora: a los Dres. Héctor Gonzáles, Saddy García, Guillermo Aguirre y Braulio La Torre por su tiempo, conocimiento y guía; a los Ing. Percy Chuquizuta y Abel Farfán por su excelente compañía, guía y apoyo durante la fase experimental de campo; al Quim. Meyer Obando del ICT y al personal de los laboratorios de Análisis de suelos, plantas, aguas y Fertilizantes y de Fertilidad de Suelos por su paciencia, tiempo y consejos para con mis imparables consultas y a aquellos profesionales y trabajadores amantes de la investigación y desarrollo de nuestra agricultura, a los Ing. Esteban Altamirano y Eliska Sanchez y a los agricultores Raimundi y equipo, colaboradores del IIAP.

Y finalmente a Jorge, mi compañero de aventuras.

RESUMEN

La investigación consistió en la evaluación de las principales características físicas y químicas del biochar producido mediante pirolisis lenta, en un rango de temperatura de 550 - 600 °C y a partir de ocho tipos de materias primas residuales de cultivos agroforestales y de cultivos de manejo tradicional de la zona norte de la Amazonía peruana, para determinar su aptitud como una enmienda del suelo agrícola y como un agente potencial en el secuestro de carbono atmosférico en el suelo.

Para la producción de biochar se aprovechó la biomasa residual de los cultivos agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*), palma aceitera (*Elaeis guineensis*), y de palmito de pijuayo (*Bactris gasipaes*) y de los cultivos de manejo tradicional de Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* Linneo) y arroz (*Oryza sativa*). Para la caracterización se siguieron los lineamientos de las normas internacionales de la ASTM, del TMECC del US Composting Council y de las metodologías propuestas en investigaciones consultadas.

Finalmente se encontraron diferencias estadísticamente significativas para todas las propiedades evaluadas del biochar según la materia prima empleada. Los biochars de cáscara de sachá inchi y de la corteza interna de palmito resultaron los más idóneos para su aplicación en el suelo como enmiendas. Así también, el biochar de cáscara de sachá inchi y del raquis de las hojas del palmito se presentan como los agentes potenciales más efectivos en el secuestro de carbono.

Palabras clave: Biochar, pirólisis, caracterización, Sistemas Agroforestales, Amazonía Peruana.

ABSTRACT

The research involved the evaluation of the main physical and chemical properties of biochar produced by slow pyrolysis within a temperature range of 550 - 600 °C and from eight types of residual feedstocks from agroforestry crops and from traditional crops management from the northern Peruvian Amazon, to determine its aptitude as an agricultural soil amendment and as a potential agent in atmospheric carbon sequestration in soil.

For the production of biochar it took advantage the residual biomass of agroforestry crops of cacao (*Theobroma cacao*), oil palm (*Elaeis guineensis*) and peach palm (*Bactris gasipaes*) and of traditional crops handling of Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis Linnaeus*) and rice (*Oryza sativa*). For biochar characterization, the guidelines of international standards of the ASTM, the TMECC of the US Composting Council and of the methodologies proposals consulted in investigations, were followed.

Finally, statistically significant differences for all the evaluated properties of biochar were found according to the raw material used. The biochar of sachá inchi shell and of the inner bark of peach palm resulted as the most suitable for application to the soil as amendments. Likewise, the biochar of sachá inchi shell and of the leaf rachis of peach palm are presented as the potential agents more effective in sequestering atmospheric carbon.

Keywords: Biochar, pyrolysis, characterization, Agroforestry Systems, Peruvian Amazon.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	OBJETIVOS	3
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1.	EL BIOCHAR	4
2.2.	FUENTES DE PRODUCCIÓN DE BIOCHAR	5
2.3.	PRODUCCIÓN DE BIOCHAR	6
2.4.	COMPOSICIÓN DEL BIOCHAR	8
2.5.	PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL BIOCHAR	9
2.6.	CARACTERIZACIÓN DEL BIOCHAR	11
2.7.	ANÁLISIS PRÓXIMO DEL BIOCHAR	12
2.8.	IMPACTOS AMBIENTALES DEL BIOCHAR	14
2.9.	EL BIOCHAR EN EL SECUESTRO DE CARBONO	15
2.10.	LA ECONOMÍA DEL BIOCHAR	16
2.11.	ESFUERZOS DE ADOPCIÓN DEL BIOCHAR EN LAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS	17
2.12.	EL CULTIVO DE CACAO EN LA AMAZONIA PERUANA	17
2.13.	EL CULTIVO DE PALMA ACEITERA EN LA AMAZONIA PERUANA	18
2.14.	EL CULTIVO DE PALMITO EN LA AMAZONIA PERUANA	18
2.15.	EL CULTIVO DE SACHA INCHI EN LA AMAZONIA PERUANA	19
2.16.	EL CULTIVO DE ARROZ EN LA AMAZONIA PERUANA	19
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	20
3.1.	ZONA DE ESTUDIO	20
3.1.1.	LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	20
3.1.2.	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO	23
3.1.3.	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS EVALUADOS	23
3.2.	MATERIALES Y EQUIPOS	25
3.3.	METODOLOGÍA	26
3.3.1.	SELECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA	26
3.3.2.	RECOLECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA	28
3.3.3.	ACONDICIONAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA	28
3.3.4.	DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL HORNO PIROLÍTICO	29
3.3.5.	PRODUCCIÓN DE BIOCHAR	31
3.3.6.	CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA	34
3.3.7.	CARACTERIZACIÓN DEL BIOCHAR	37
3.3.8.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	41
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1.	PRODUCCIÓN DE BIOCHAR	42
4.2.	PROPIEDADES POTENCIALES DEL BIOCHAR SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE LOS SUELOS	52
4.3.	POTENCIALIDAD DEL BIOCHAR COMO HERRAMIENTA DE CAPTURA DE CARBONO ATMOSFÉRICO	65
V.	CONCLUSIONES	73
VI.	RECOMENDACIONES	75
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
VIII.	ANEXOS	83

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1: DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE USO DE TIERRA EVALUADOS	21
CUADRO 2: RELACIÓN DE ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE LA BIOMASA Y METODOLOGÍA APLICADA	36
CUADRO 3: RENDIMIENTOS EN LA PRODUCCIÓN DE BIOCHAR DE LOS DIFERENTES TIPOS DE MATERIA PRIMA	46
CUADRO 4: RELACIÓN DE CONSTITUYENTES MINERALES (G KG-1) Y DE METAL PESADO (MG KG-1) DEL BIOCHAR Y SU RESPECTIVA MATERIA PRIMA	54
CUADRO 5: INFLUENCIA DEL NIVEL DE PIROLISIS SOBRE LA COMPOSICIÓN DE NUTRIENTES DEL BIOCHAR RESULTANTE	56
CUADRO 6: INFLUENCIA DEL NIVEL DE PIROLISIS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL BIOCHAR	61
CUADRO 7: CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA, CARBONO ORGÁNICO TOTAL, FACTOR DE CONVERSIÓN Y RELACIÓN C/N DE LOS BIOCHARS RESULTANTES	62
CUADRO 8: INFLUENCIA DEL NIVEL DE PIROLISIS DE BIOCHAR SOBRE EL ANÁLISIS PRÓXIMO	71

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1	REPRESENTACIÓN SIMPLE DEL PROCESO DE PIROLISIS	7
FIGURA 2	ANÁLISIS PRÓXIMO Y ÚLTIMO DE CARBONES	12
FIGURA 3	MAPA DE UBICACIÓN DE LA ZONA EVALUADA	22
FIGURA 4	MATERIAS PRIMAS SELECCIONADAS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOCHAR	27
FIGURA 5	RECOLECCIÓN Y DISPOSICIÓN DE LA MATERIA PRIMA	29
FIGURA 6	HORNO PIROLÍTICO DE DOBLE TAMBOR PARA LA PRODUCCIÓN DE PIROLISIS LENTA DE BIOCHAR	30
FIGURA 7	VISTA EN PLANTA DE LOS DOS TAMBORES DEL HORNO PIROLÍTICO	31
FIGURA 8	PRODUCCIÓN DE BIOCHAR	33
FIGURA 9	ANÁLISIS DE LABORATORIO	41
FIGURA 10	CONTROL DE HUMO EN EL PROCESO DE PIROLISIS	43
FIGURA 11	MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE BIOCHARS DE CÁSCARA DE CACAO	43
FIGURA 12	MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE BIOCHARS DE PECIOLO DE PALMA ACEITERA	43
FIGURA 13	MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE BIOCHARS DE HOJA DE PALMA ACEITERA	44
FIGURA 14	MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE BIOCHARS DE LA CORTEZA EXTERNA DEL PALMITO	44
FIGURA 15	MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE BIOCHARS DEL RAQUIS DE LA HOJA DEL PALMITO	44
FIGURA 16	MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE BIOCHARS DE CÁSCARA DE SACHA INCHI	45
FIGURA 17	MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE BIOCHARS DE CASCARILLA DE ARROZ.	45
FIGURA 18	MUESTRAS REPRESENTATIVAS DE BIOCHARS DE LA CORTEZA INTERNA DEL PALMITO	45
FIGURA 19	NIVEL DE PIROLISIS DEL BIOCHAR DE CÁSCARA DE CACAO	47
FIGURA 20	NIVEL DE PIROLISIS DEL BIOCHAR DE PECIOLO DE PALMA ACEITERA	48
FIGURA 21	NIVEL DE PIROLISIS DEL BIOCHAR DE LA HOJA DE PALMA ACEITERA	48
FIGURA 22	NIVEL DE PIROLISIS DEL BIOCHAR DE LA CORTEZA EXTERNA DEL PALMITO	49
FIGURA 23	RELACIÓN DE MACRONUTRIENTES (G KG-1) ENTRE LA MATERIA PRIMA (MB) Y SU RESPECTIVO BIOCHAR (B) PRODUCIDO A 550-600°C	52
FIGURA 24	DENSIDAD APARENTE DE LOS BIOCHARS DERIVADOS DE 8 TIPOS DE BIOMASAS RESIDUALES	56
FIGURA 25	PH DE LA SOLUCIÓN BIOCHAR EN BASE A DOS METODOLOGÍAS Y DOS TIEMPOS DE EQUILIBRIO	58
FIGURA 26	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA SOLUCIÓN DE BIOCHAR (DS/M) EN BASE A DOS METODOLOGÍAS Y DOS TIEMPO DE EQUILIBRIO	60
FIGURA 27	CORRELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO Y EL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA DEL BIOCHAR	63
FIGURA 28	RELACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LA MATERIA PRIMA Y SU RESPECTIVO BIOCHAR	66
FIGURA 29	RELACIÓN DEL CONTENIDO DEL MATERIAL MÓVIL, CENIZAS Y CARBONO FIJO DEL BIOCHAR	67
FIGURA 30	RELACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZA Y PH DEL BIOCHAR	70

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: BASE DE DATOS	83
ANEXO 2: RELACIÓN DE VARIABLES SOBRE EL NIVEL DE PIROLISIS DEL BIOCHAR PARA CADA TIPO DE MATERIA PRIMA	86
ANEXO 3: ANÁLISIS DE VARIANZA SEGÚN LA DENSIDAD APARENTE DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE MATERIA PRIMA EMPLEADOS	87
ANEXO 4: ANÁLISIS DE VARIANCA SEGÚN EL PH DE LA METODOLOGÍA 1 DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS	88
ANEXO 5: ANÁLISIS DE VARIANCA SEGÚN EL PH DE LA METODOLOGÍA 2 DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS	89
ANEXO 6: ANÁLISIS DE VARIANCA SEGÚN LA CE DE LA METODOLOGÍA 1 DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS	90
ANEXO 7: ANÁLISIS DE VARIANCA SEGÚN LA CE DE LA METODOLOGÍA 2 DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS	91
ANEXO 8: ANÁLISIS DE VARIANCA SEGÚN EL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS	92
ANEXO 9: ANÁLISIS DE VARIANCA SEGÚN EL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNITO TOTAL DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS	93
ANEXO 10: ANÁLISIS DE VARIANCA SEGÚN EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS	94
ANEXO 11: ANÁLISIS DE VARIANCA SEGÚN EL CONTENIDO DE MATERIAL MÓVIL DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS	95
ANEXO 12: ANÁLISIS DE VARIANCA SEGÚN EL CONTENIDO DE CENIZA DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS	96
ANEXO 13: ANÁLISIS DE VARIANCA SEGÚN EL CONTENIDO DE CARBONO FIJO DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS	97

I. INTRODUCCIÓN

En muchas zonas del país la productividad agrícola se ve afectada debido a las condiciones naturales de los suelos pobres y/o al manejo inadecuado de la tierra. Según Hale et al. (2013), un problema específico es la falta o pérdida de nutrientes necesarios para las plantas y esto es particularmente cierto en los suelos de la Amazonía peruana, puesto que se tratan de suelos ácidos altamente meteorizados que presentan poca capacidad de retención de nutrientes catiónicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , entre otros) y porque sus contenidos de materia orgánica y nitrógeno se ven agotados. También, estos suelos tienen comúnmente concentraciones altas de óxidos de hierro y aluminio, compuestos que tienen el potencial de atar el Fósforo, dejándolo no disponible para la planta y causando deficiencias (FAO, 2006).

Ante esta situación se plantea la producción de biochar, un compuesto estable y rico en carbono producto de la pirólisis de la biomasa, para evaluar la calidad de sus propiedades y relacionarlas con sus efectos potenciales sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. Los estudios han demostrado que, en general, se mejoran las propiedades del suelo al incrementar la disponibilidad de nutrientes y el biochar, además de aportar nutrientes al suelo es capaz de mejorar la captación de nutrientes por parte de la planta (Lehmann y Joseph, 2009)

Por otro lado, los suelos de la Amazonía son mayormente suelos forestales destinados a la agricultura y debido a las malas prácticas agronómicas se deforestan los bosques y se emite dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera. El biochar, al ser utilizado como una enmienda, se presenta también como una herramienta potencial para el secuestro de carbono en el suelo, debido a la alta estabilidad del carbono en el biochar. Los estudios sugieren que el biochar secuestra aproximadamente el 50% del carbono disponible de la biomasa pirolizada, dependiendo del tipo de materia prima (Lehmann et al., citado por Shenbagavalli y Mahimairaja, 2012b).

El propósito de esta investigación es la de presentar una detallada caracterización de los diferentes tipos de biochar obtenidos bajo condiciones de pirolisis lenta usando la biomasa residual local de los cultivos agroforestales de palma aceitera (*Elaeis guineensis*), palmito de pijuayo (*Bactris gasipaes*) y cacao (*Theobroma cacao*), y de los cultivos de manejo tradicional de Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* Linneo) y arroz (*Oryza sativa*) del departamento de San Martín para el análisis de sus efectos potenciales sobre el suelo y su aptitud en el secuestro de carbono atmosférico.

La contribución individual de esta investigación se dirige a enriquecer las bases sobre el conocimiento del biochar y a complementar los vacíos de información actual sobre su naturaleza y sus implicancias sobre los entornos ambientales. Así también se presenta como el primer paso para futuras investigaciones sobre el esquema de producción ingenieril de biochar en el país. Los siguientes pasos serán la evaluación de sus efectos sobre los rendimientos de los cultivos, la determinación y formulación de las propiedades ideales del biochar en base al análisis de los suelos de los cultivos y la producción del biochar planteado con las propiedades indicadas.

Es necesario recalcar que el biochar no es un fertilizante sino una enmienda del suelo que se va a utilizar junto con otras fuentes adecuadas de nutrientes. Así también, es necesario considerar que la producción de biochar, a nivel ingenieril, es un proceso relativamente nuevo y son pocos los estudios desarrollados en Sudamérica, en el Perú no se ha encontrado ninguno y a nivel internacional son pocos los estudios sobre la producción de biochar en base a las materias primas definidas.

Las hipótesis que guiaron esta investigación son las siguientes: (1) “El biochar producido a partir de las materias primas de tres cultivos agroforestales de la Amazonía peruana y de dos cultivos de manejo tradicional, bajo condiciones de pirolisis lenta, presenta características que podrían mejorar las propiedades físicas y químicas de los suelos agrícolas de la Amazonía”. (2) “El biochar es un agente potencial en el secuestro de carbono atmosférico en el suelo”.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de la presente tesis es el de evaluar y comparar la calidad del biochar, en base a su composición y a sus características y propiedades físicas y químicas para prever sus posibles efectos potenciales sobre la productividad del suelo y evaluar la aptitud del biochar en el secuestro de carbono atmosférico en el suelo.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diseñar y desarrollar a nivel de campo un horno pirolítico para la producción requerida de biochar.
2. Determinar las condiciones operacionales del proceso de pirolisis lenta y proceder con la producción de biochar.
3. Establecer y analizar las principales características del biochar, obtenido de las diferentes materias primas establecidas, para determinar la relación de sus propiedades potenciales sobre la productividad de los suelos.
4. Evaluar la potencialidad del biochar como una herramienta para la captura de carbono atmosférico.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. EL BIOCHAR

Desde el punto de vista de producción, el biochar es un carbón vegetal estable y altamente poroso obtenido mediante la descomposición térmica de materia orgánica bajo un entorno con suministro de oxígeno limitado (O_2) y ante temperaturas medias ($<700^\circ C$) (Lehmann y Joseph, 2009).

Desde el punto de vista químico, el biochar es más difícil de precisar debido a que puede ser producido a partir de un sinnúmero de materias primas orgánicas y bajo una gran variedad de condiciones de carbonización (variaciones en la temperatura de pirólisis, velocidad de reacción, etc.), que le otorgan características químicas particulares. La estructura del biochar puede variar en complejidad, desde estructuras tipo grafito hasta anillos aromáticos de alto peso molecular que son conocidos por persistir en el suelo durante miles a millones de años (McHenry, citado por Azri Sukiran et al., 2011). Estos grupos poli-aromáticos condensados le otorgan al biochar una estabilidad biológica y química prolongada frente a la degradación microbiana. Así mismo, dependiendo del tipo de materia prima y de las condiciones de producción, McElligott et al. (2011) afirma que se pueden formar algunos contaminantes durante la pirolisis, tales como Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs).

Desde el punto de vista aplicativo, el biochar se define como una enmienda del suelo debido a sus propiedades físicas, químicas y biológicas y a sus interacciones con el suelo y la planta, capaz de incrementar el rendimiento de los cultivos, contribuir con el reciclaje de nutrientes del suelo y a capturar y fijar carbono atmosférico en el suelo como carbono orgánico. Mientras que la producción de carbón vegetal o charcoal en inglés, mediante la carbonización de la madera o de sus derivados, es usado principalmente como fuente energética.

En general, el proceso de producción de biochar junto con su uso final, forman la base para su clasificación y terminología. Por otro lado, el biochar es un término reservado para los materiales derivados de la biomasa de plantas y excluye a los productos de combustibles fósiles o carbón geogénico (Lehman et al., citados por Shenbagavalli y Mahimairaja, 2012a). Así también, el biochar rico en carbono orgánico difiere de las cenizas producidas por la quema de biomasa a fuego abierto y que contienen principalmente minerales como calcio, magnesio y carbonatos inorgánicos.

2.2. FUENTES DE PRODUCCIÓN DE BIOCHAR

En la actualidad, la biomasa está siendo considerada como una fuente renovable importante que puede contribuir a la economía, sostenibilidad y seguridad energética de un país (Azri Sukiran et al., 2011). Para países agrícolas y en vías de desarrollo el aprovechamiento de los residuos de cosechas puede resultar muy beneficioso y aunque no se precisan términos exactos, es innegable que pueden presentarse como una gran fuente de aprovechamiento, no sólo desde el punto de vista del tema energético sino también para el manejo de los suelos.

En general, son muchas las materias primas potenciales para la producción de biochar y sus propiedades deseadas se encontrarán en función de la selección así como del método de producción empleado. Teóricamente se puede aprovechar cualquier tipo de biomasa, desde residuos agrícolas, forestales y de granja hasta residuos domésticos e industriales.

Con respecto a los residuos forestales y agrícolas, estos suelen ser aprovechados para la producción de abonos orgánicos y en los últimos años, para la producción de biocombustibles. Por otro lado, en los sistemas agroforestales de la Amazonía, buena parte de la biomasa residual es usualmente dejada en el campo como mantillo con el fin de retener la fertilidad del suelo, un proceso que puede durar muchos años. También, en situaciones donde los residuos que son dejados en el campo, que resultan abundantes y que ocupan grandes extensiones, suelen ser incinerados. Sin embargo, se presenta la oportunidad del uso de la biomasa residual agrícola como materia prima para generar un producto de mayor valor agregado.

2.3. PRODUCCIÓN DE BIOCHAR

En general, la biomasa puede ser transformada mediante tres procesos principales: (1) mediante procesos de conversión bioquímica a través de la acción microbiana (fermentación alcohólica para la producción de etanol y digestión anaerobia para la producción de metano), (2) procesos de conversión termoquímica a través de la acción térmica (combustión en condiciones con exceso de aire, gasificación en presencia de cantidades limitadas de aire y pirolisis en ausencia de aire) y (3) mediante procesos de conversión físico-química (prensado y extracción para la producción de aceites vegetales).

En la mayoría de los estudios, las metodologías seguidas para la producción de biochar se han centrado en el proceso de pirolisis y en menor grado en el proceso de gasificación.

2.3.1. PIROLISIS

La pirolisis es un proceso de descomposición termoquímica en donde la materia orgánica es convertida en un sólido rico en carbono y en materia volátil, mediante calentamiento en condiciones de bajo contenido o en ausencia de oxígeno (Demirbas y Arin, citados por Brownsort, 2009). El sólido, comúnmente conocido como biochar, presenta un alto contenido de carbono y puede contener hasta cerca de la mitad del total de carbono de la materia orgánica original. Por otro lado el material volátil puede ser parcialmente condensado para obtener una fracción líquida conocida como bio-oil, dejando una fracción de gases no condensables denominado syngas. Estos subproductos pueden ser aprovechados como una fuente de energía. A continuación se presenta la ecuación básica de producción de biochar:

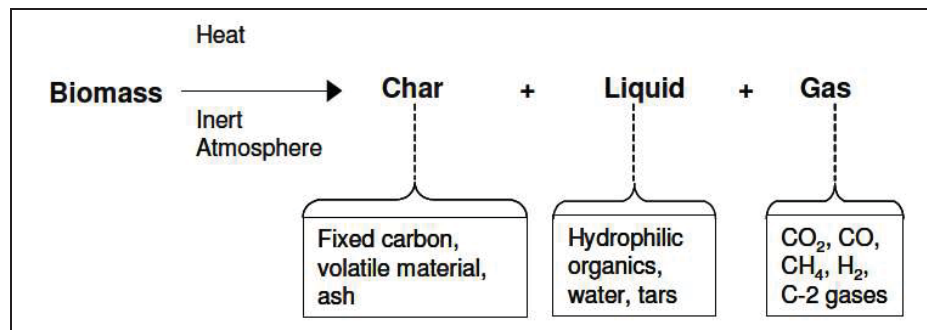


Figura 1: Representación simple del proceso de pirolisis. Fuente: Brownsort (2009).

Existen dos tipos de procesos de pirolisis: pirolisis lenta y pirolisis rápida.

La pirolisis lenta es el tipo de tecnología más utilizado; sin embargo como su nombre lo indica, el proceso se caracteriza por trabajar con velocidades lentas de calentamiento, con tiempos relativamente largos de residencia sólida y de vapor y por lo general, con temperaturas de producción inferiores a las de la pirolisis rápida, típicamente a 400°C (Brownsort, 2009). Por ende y dependiendo de la tecnología, el proceso puede llegar a tardar varias horas. En la pirolisis lenta el enfoque principal es la producción de biochar, aunque irá acompañado por la generación de productos líquidos y gases que no necesariamente son recuperados.

Por otro lado, la producción de biochar mediante pirolisis rápida está típicamente reservada para la producción de energía. Este tipo de pirolisis se caracteriza por velocidades de calentamiento elevadas y por tiempos cortos de residencia de vapor. Requiere generalmente un tipo de material preparado para la alimentación, en tamaños de partículas pequeños y con un diseño que elimina rápidamente los vapores (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.

2.4. COMPOSICIÓN DEL BIOCHAR

La composición del biochar varía de acuerdo al tipo de materia prima empleado. Sin embargo, se encuentra compuesto principalmente de carbono orgánico recalcitrante y de contenidos de macro y micronutrientes retenidos de su materia prima original. Así también, se encuentra compuesto por una concentración variada de otros elementos tales como oxígeno (O), hidrógeno (H), azufre (S), cationes básicos, metales pesados y de compuestos orgánicos. Por otro lado, la composición dependerá también de las condiciones de pirolisis puesto que algunos contaminantes pueden formarse durante el proceso de producción, tal es el caso de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAPs), formados a partir de cualquier materia carbonácea.

Con respecto a los macronutrientes, el nitrógeno es el más sensible al calor y por ende, se espera que su contenido sea bajo en el biochar producido a elevadas temperaturas (Tyron, citado por Shenbagavalli y Mahimairaja, 2012a). Los estudios han demostrado que en la

mayoría de las muestras de biochar se exhiben niveles bajos de nitrógeno atribuido a su pérdida ya sea como amoníaco u óxidos de nitrógeno durante el proceso de carbonización (McLaughlin et al., 2009). Por otro lado, teóricamente, el carbono se volatiliza alrededor de los 100 °C, el nitrógeno a los 200 °C, el azufre sobre los 375 °C y el potasio y fósforo sobre los 700 – 800 °C.

Con respecto a los metales pesados y elementos traza, su presencia en el biochar puede verse concentrada debido a que muchos de ellos son fácilmente absorbidos y translocados por las plantas. Por ello es importante y se recomienda determinar los constituyentes de la materia prima y su concentración antes de la producción y aplicación del biochar.

2.5. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL BIOCHAR

2.5.1. pH DE LA SOLUCIÓN DE BIOCHAR

El pH es una característica muy importante a considerar debido a que es un determinante directo sobre los efectos de la relación suelo – biochar – planta y el pH resultante dependerá de la materia prima original y de las condiciones operacionales (Lehmann, citado por McElligot et al. 2011)

Existen diferentes metodologías para la medición del pH de una solución de biochar, dicha medición sobre una muestra fresca puede no reflejar con precisión el impacto de su pH en el suelo, especialmente luego de que el biochar alcance un equilibrio con el dióxido de carbono atmosférico, convirtiendo muchos de los hidróxidos alcalinos en carbonatos correspondientes y con ello disminuyéndose el pH de la muestra (McLaughlin et al., 2009). También, al momento de crear la solución de biochar, muchos de ellos son difíciles de mojar por una serie de razones: porque el biochar presenta niveles elevados de aceites y alquitranes hidrófobos condensados, porque existe una fracción significativa de madera asada o de *Torrefied Wood*¹ en el biochar o porque el biochar tiene una fracción significativa de sitios microporosos que requieren de vapor de agua para esto migre y se condense sobre ellos para así lograr humedecerlos. Las dos primeras condiciones no son

¹ Torrefied wood: biomasa combustible que se calienta en un rango de 100 a 280 grados centígrados.

favorables para usar el biochar como una enmienda mientras que el último es altamente deseable y recomendable (McLaughlin, 2010).

Por lo anterior referido, McLaughlin (2010) plantea un método para diferenciar un buen biochar de un mal biochar, mediante el calentamiento de la suspensión del biochar para promover la migración del vapor de agua hacia los poros. Con este método se proporcionaría un reparto aproximado de los componentes del biochar y se podría proporcionar información adicional sobre el impacto probable del biochar sobre el suelo y el equilibrio que podría alcanzarse con los niveles de humedad del suelo.

2.5.2. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO

La Capacidad de Intercambio Cationico o CIC es una características importante en el suelo por que determina la adsorción y desorción de nutrientes y por ende, de su disponibilidad en el suelo (Shenbagavalli y Mahimairaja, 2012a). Una elevada CIC en el biochar puede deberse a la presencia de grupos funcionales oxidados (grupos carboxil) en su superficie luego de una degradación microbiana. La presencia de estos grupos puede verse indicada por una elevada tasa de O/C.

Particularmente, el biochar producido recientemente tiene menos capacidad para retener cationes, indicando una baja CIC (Cheng et al., 2006 y Lehmann, 2007). Pero con el tiempo y la incorporación en el suelo, las superficies de las partículas del biochar se oxidan e interactúan con los constituyentes del suelo, resultando en un aumento de los grupos funcionales y en una mayor carga de superficie negativa, conduciendo finalmente a un aumento de la CIC (McElligott et al., 2011). La medición de la CIC de un biochar determina el nivel actual de dicha propiedad en el momento de la medición. Sin embargo, no indica qué capacidad adicional puede llegar a presentarse en el futuro.

2.5.3. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA O SOLIDOS TOTALES DISUELTOS

La conductividad eléctrica representa la medida del contenido total de sales disueltas en el biochar, incluyendo todos los fertilizantes y sales neutras que se encuentran en la solución. No es necesariamente un problema, pero demasiada sal tiene un efecto adverso en la mayoría de las plantas.

Generalmente un biochar con un contenido significativo de cenizas tienen una mayor probabilidad de elevar los Sólidos Totales Disueltos ya que las sales solubles se miden como cenizas.

2.6. CARACTERIZACIÓN DEL BIOCHAR

Además de la selección de la materia prima, la técnica de producción, y las condiciones de producción para producir un biochar con características específicas, es sumamente importante la identificación y delimitación de las pruebas analíticas o de los análisis básicos para establecer un conjunto mínimo de datos de caracterización de biochar para poder comparar resultados. Así también es importante además de definir las características a evaluar, establecer un conjunto de métodos estandarizados, pues a la fecha no existe ninguno por tratarse de un relativo “nuevo” campo de investigación. Sin embargo, es necesario recalcar las iniciativas del International Biochar Initiative (IBI) por plantear unas directrices “Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil”.

No se ha establecido una jerarquía de las principales propiedades del biochar y normalmente para su caracterización se siguen lineamientos de métodos ya establecidos y desarrollados para otros materiales. Uno de ellos son los procedimientos de las normas ASTM, en este caso desarrollados para la caracterización de combustibles sólidos, especialmente carbones y son dos las principales pruebas, el análisis proximal y análisis último que miden cómo un carbón específico o una muestra similar al carbón se desempeñarán cuando son destinados en procesos de combustión de combustibles fósiles. La Figura 2 resume el análisis básico de los análisis próximo y último desarrollados para la caracterización de carbones vegetales.

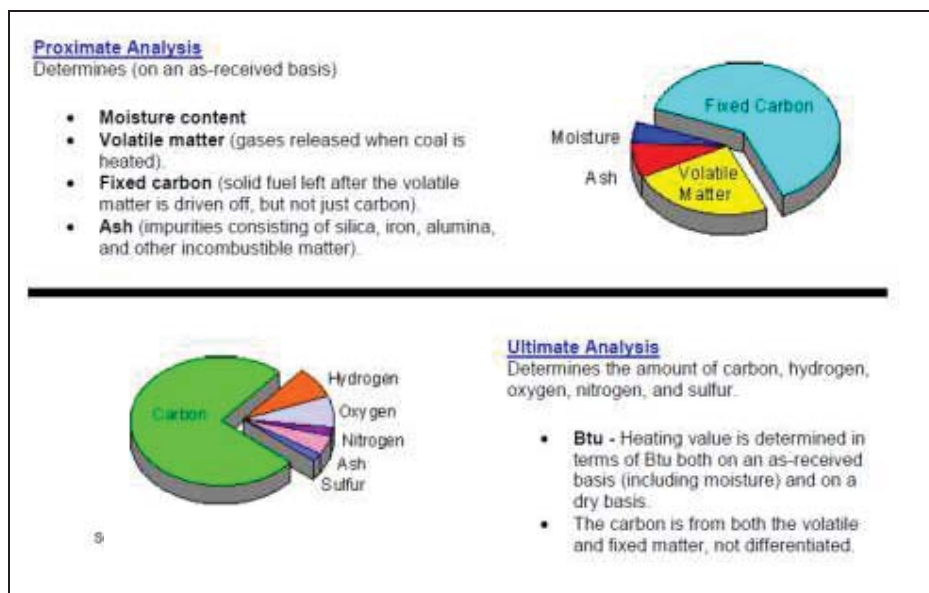


Figura 2: Análisis Próximo y Último de carbones. Fuente: McLaughlin et al. (2009).

2.7. ANÁLISIS PRÓXIMO DEL BIOCHAR

2.7.1. CONTENIDO DE HUMEDAD

Teóricamente la humedad del biochar es considerada como la cantidad de masa de agua perdida durante el secado de la muestra, asumiendo que este es el único material volátil presente a los 105°C. Sin embargo, McLaughlin (2010), considera que además del vapor de agua existe la posibilidad de expulsar solventes orgánicos de bajo punto de ebullición (< 105°C) como el metanol y ácido acético, fáciles de detectar por su olor.

Al igual que el carbón activado, los estudios demuestran que el biochar es un material higroscópico, pues presenta una gran aptitud para adsorber humedad en el medio en el que se encuentra. De acuerdo a McLaughlin (2010), a 105°C el agua libre del biochar es removida y a 200 °C, el agua adsorbida. También menciona que durante el calentamiento por encima de los 105 °C algunos biochars pueden carbonizarse aún más, emitiendo significativamente sustancias volátiles e incluso humo y esto sería un indicador que el biochar no está totalmente carbonizado y probablemente se comporten de manera diferente en el suelo en comparación con biochars totalmente carbonizados.

2.7.2. CONTENIDO DE MATERIAL MÓVIL Y/O VOLÁTIL

De acuerdo a los lineamientos del ASTM, el contenido de material volátil se define como la pérdida de masa del producto gaseoso, excluyendo el vapor húmedo en la muestra del carbón. Para el biochar, McLaughlin et al. (2009) recomiendan cambiar el término “Volátil” a “Móvil” por el hecho de que dicho contenido es capaz de ser removido pero no necesariamente como gas sino también vía degradación microbiana o por lixiviación en el suelo. Entonces el término Móvil hace referencia a una falta de permanencia y es la materia que abandona la biomasa completamente seca, dejando la ceniza y los constituyentes de la materia residente del biochar.

2.7.3. CONTENIDO DE CENIZA

La ceniza es la fracción no orgánica del biochar libre de humedad. En usos finales específicos, la cantidad y la composición de ceniza puede influir sobre ciertas propiedades deseadas en el biochar. El contenido de cenizas del biochar es un indicador de la concentración de nutrientes. Por lo general, los principales minerales son silicio (Si), calcio (Ca), potasio (K), sodio (Na), magnesio (Mg) y cantidades más pequeñas de azufre (S), fósforo (P), hierro (Fe), manganeso (Mn) y de aluminio (Al). Estos elementos se encuentran en sus formas de óxidos, silicatos, carbonatos, sulfatos, cloruros y fosfatos en el biochar (Ravedraan et al., 1995).

2.7.4. CONTENIDO DE CARBONO FIJO

ASTM establece que el contenido de Carbono Fijo es el residuo del análisis del contenido de materia móvil y se determina restando a 100 la suma de los porcentajes del material volátil y cenizas, todos referidos en base seca. Por otro lado, McLaughlin et al. (2009), difieren al considerar que la porción de Carbono Fijo del Análisis Próximo del biochar no es carbón puro, sino que es todo lo que no es ceniza y no se volatiliza a 950°C. Un término más apropiado sería el de Materia Residente, que incluye tanto al Carbono Residente como al Hidrógeno y Oxígeno Residente.

2.8. IMPACTOS AMBIENTALES DEL BIOCHAR

Los principales beneficios de la adición de biochar se resumen en las mejoras de la retención e infiltración del agua del suelo, en su Capacidad de Intercambio Catiónico, en la retención de nutrientes, el incremento de su pH, en la eficiencia del uso de Nitrógeno y en la estimulación del crecimiento microbiano y sobre todo en posibles efectos duraderos sobre el suelo, por ser una forma estable de carbono altamente resistente a la degradación microbiana.

Los efectos observados en la fertilidad del suelo han sido explicados mayormente por un incremento del pH en los suelos ácidos (Van Zwieten et al., citados por Lehmann et al., 2011). “En las zonas tropicales se han reportado altos incrementos en los rendimientos de cultivos donde el biochar es adicionado junto con fertilizantes orgánicos o inorgánicos, reportando incrementos de 200% con respecto a parcelas sin enmiendas” (Yamato et al., citados por McElligott et al., 2011). Esto sería de mucha utilidad para el país por que los suelos en la Amazonía son mayormente suelos evolucionados y muy ácidos, denominados suelos ultisoles.

También, el biochar presenta la capacidad de mantener estos nutrientes disponibles para el aprovechamiento de la planta, en comparación con otros materiales orgánicos tales como hojarasca, compost o estiércoles. Con respecto al aspecto biológico, muchos estudios han encontrado que la biomasa microbiana se ha visto incrementada como resultado de las adiciones de biochar (Lehmann et al., 2011). Además de los nutrientes de la planta, el biochar es capaz de adsorber o retener otros compuestos químicos, como metales pesados, herbicidas, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos, entre otros.

Por ende, adicionado de forma adecuada, el biochar es capaz de incrementar la productividad del suelo en un rango variado, entre 0-300 por ciento (Maia et al., 2011). Sin embargo, se recomienda la adición de biochar junto con otra enmienda para asegurar el incremento del rendimiento de los cultivos.

2.9. EL BIOCHAR EN EL SECUESTRO DE CARBONO

El biochar, a través de los sistemas de producción de pirolisis, se presenta como una medida potencial en el secuestro de carbono atmosférico en el suelo bajo una forma inerte debido a que el biochar, incorporado en el suelo bajo ciertas condiciones, puede ser estable por un largo periodo de tiempo y porque puede presentar un contenido elevado de carbono retenido tenazmente en su estructura. De acuerdo a Lehmann y Joseph (2009), cerca del 50% del total de carbono de la biomasa original es retenido y esto debido a que durante la pirolisis, entre el 20-50 por ciento del carbono de la biomasa es convertido a una forma recalcitrante (Mok et al., citado por Laird et al., 2011). Con esta particularidad no sólo se puede mejorar la estructura del suelo, sino también se puede retener y fijar el carbono a largo plazo y no ser liberado como dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera.

La estructura química a la que se hace referencia presenta grupos poli-aromáticos condensados que proveen una estabilidad biológica y física prolongada que sustentan la lucha contra la degradación microbiana (Lehmann et al., 2006, citado por Shenbagavalli y Mahimairaja, 2012b).

Por otro lado, la producción de biochar se presenta como una nueva propuesta para la mitigación del cambio climático. La eficacia del uso de biochar como un enfoque para mitigar el cambio climático se basa en su recalcitrancia relativa frente a la descomposición microbiana y por tanto en un retorno más lento del C orgánico terrestre como dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera (Lehmann, citado por Lehmann et al., 2011), Según Laird et al. (2011), el biochar puede presentar una tasa de descomposición de 0.5 por ciento por año, además que, durante la pirolisis.

Las selvas tropicales son ecosistemas sumamente importantes para la regulación del clima global y la biodiversidad (Glaser y Birk 2012) y la deforestación de los trópicos representa aproximadamente el 20-29 por ciento de las emisiones globales antropogénicas de Gases de Efecto Invernadero (Watson et al., citados por Naughton-Treves, 2003). Una de las técnicas más utilizadas en la Amazonía es la del corte y quema o agricultura migratoria que es usada para el acondicionamiento de áreas para la siembra de cultivos y ocurre también, que en muchas de estas situaciones, éstas áreas se encuentran destinadas para otros usos, tal es el caso de la foresta de los trópicos húmedos. Con esta técnica se desbrozan bosques

primarios y secundarios emitiéndose significativa cantidad de dióxido de carbono a la atmosfera además que se pierde muy rápido la productividad del suelo, debido al deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Alegre et al., 2001), entonces el agricultor se ve en la necesidad de abandonar la parcela en barbecho por un tiempo variable para posteriormente volver con los cultivos y continúa clarificando los bosques, magnificando la deforestación. Con la tala y quema, gran parte del carbón que está almacenado en la vegetación es perdido hacia la atmósfera principalmente como CO₂ (Alegre et al., 2001). También, desde hace unas décadas se planteó una nueva propuesta de uso, los sistemas agroforestales. Estos sistemas presentan un volumen significativo de biomasa que integra imprescindible al componente leñoso, otorgando un relativo potencial para secuestrar carbono, dependiendo de la densidad del sistema y su manejo (Callo Concha, 2011). Ahora, se propone otra alternativa, la del corte y carbonización; con la pirolisis de la biomasa se obtienen productos aprovechables que permiten mejorar los rendimientos del suelo a la vez que se reducen las emisiones por deforestación y degradación de suelos.

2.10. LA ECONOMÍA DEL BIOCHAR

El aprovechamiento de un porcentaje de los residuos agrícolas dejados usualmente en campo y que no están destinados a ser reutilizados y resulta principalmente beneficiario y económico para los pequeños y medianos agricultores pues representa una inversión mínima frente a los costos de compra y transporte de abonos y/o fertilizantes. Sin embargo, una producción a gran escala de biochar para fines agronómicos podría representar una gran inversión económica, pues ya no se habla de una producción en lotes, sino una producción continua de biochar con un equipo más sofisticado y con un mayor control de variables. Sin embargo, la potencialidad del biochar de mejorar los suelos improductivos o degradados y de proporcionar beneficios en la calidad del medio ambiente, pues también se hace referencia a la reducción de la biodisponibilidad de contaminantes ambientales

2.11. ESFUERZOS DE ADOPCIÓN DEL BIOCHAR EN LAS PRÁCTICAS AGRÍCOLAS

En total, son muchas las potencialidades del biochar capaces de generar situaciones beneficiarias, siendo producido, analizado y aprovechado apropiadamente. Con esta técnica, podrían beneficiarse directamente los agricultores e indirectamente, pero de manera importante, los demás actores involucrados. También, podrían ayudar a los agricultores a promover un tipo de agricultura sostenible, al cambiar de un tipo de técnica agrícola emisora de Carbono a una en la que el biochar es usado como una herramienta sumidera de carbono, siendo producido a partir del aprovechamiento de la biomasa residual, pudiendo esto a su vez, reducir los costos en la inversión de insumos para los cultivos. En general ayudaría a reducir la huella de carbono de las actividades agrícolas.

2.12. EL CULTIVO DE CACAO EN LA AMAZONIA PERUANA

EL Sistema Agroforestal de Cacao es uno de los sistemas más populares de la región San Martín, ubicándose en el tercer lugar de producción de cacao. En la región se promueve el uso de injertos con la introducción y uso del genotipo CCN-51 como variedad mejorada de alta productividad. Este sistema domina el estrato medio de las cuencas y se reconoce que la calidad del cacao mejora en asociación con árboles en sistemas multiestratos. La calidad del cacao dependerá tanto del origen del material como del manejo y control sanitario pues este este cultivo suele verse afectado por las condiciones climáticas del lugar, siendo las cáscaras dejadas en campo los medios de cultivos para la propagación de enfermedades y plagas, por ello es recomendable su reciclaje.

Awolumate (1983) señala que las cenizas de las cáscaras del cacao son pobres en Mn, Cu, Zn pero ricas en Ca, N, K, Na, P, Fe y Mg. Por otro lado, Oddoye (2012) menciona que la ceniza también puede convertirse en un abono rico en potasio. Mejía Palencia (2002) demuestra que la cáscara de cacao puede ser utilizada para obtener un abono orgánico que consiste en una mezcla de residuos de cosecha de las plantas cultivadas (hojas, tallos, frutos, desperdicios).

2.13. EL CULTIVO DE PALMA ACEITERA EN LA AMAZONIA PERUANA

La palma aceitera en la actualidad es el cultivo perenne oleaginoso con mayor cantidad de aceite que se produce por hectárea y tiene altas concentraciones de grasa no monosaturadas y es rico en vitamina E.

La palma aceitera es de sumo interés para la producción de biocombustibles o biodiesel en el país. La región San Martín (Tocache - Juanjui) produce aceite de palma en 100.000 Has destinadas para su producción exclusiva. En tal sentido la situación emergente de la palmicultura en el Perú constituye además de un importante ingreso económico, un medio de generación de cantidades significativas de residuos de las cosechas de aceite de palma.

2.14. EL CULTIVO DE PALMITO EN LA AMAZONIA PERUANA

El cultivo de palmito en la región San Martín se viene dando desde el año 1997, se instala como parte del paquete de la lucha contra el narcotráfico y es uno de los cultivos de mayor rentabilidad en la zona. Proviene de la palmera del pijuayo, siendo los brotes terminales tiernos de la parte alta del tallo. El palmito de pijuayo es una especie de hábito netamente heliófila, no tolera sombreado, pero como componente temporal se asocia con otros cultivos como: yuca, piña, castaña, tornillo y otros.

El palmito es un vegetal de fácil digestión y bajo contenido de grasa, contiene un alto nivel de fibras digestibles, vitamina C, hierro y algunos aminoácidos esenciales, no contiene colesterol. Parte de esos nutrientes quedan en los residuos luego de la cosecha, (maleza, corteza, raquis, cascaras), y son nuevamente aportados al suelo.

2.15. EL CULTIVO DE SACHA INCHI EN LA AMAZONIA PERUANA

El sacha inchi es una especie propia de la amazonia peruana. Crece en suelos ácidos y con alta concentración de aluminio y se asocia con casi todos los cultivos de la región (algodón, plátano, frijol, maíz, yuca, frutales, especies forestales etc.). Se encuentra distribuida en San Martín, Huánuco, Amazonas, Madre de Dios, Loreto y Cuzco y es una especie con gran aporte nutricional para la alimentación mundial, según estudios realizados por la Universidad de Cornell - USA. Los residuos luego de la cosecha de sacha inchi

contienen nutrientes, óxidos y sales minerales sin embargo no se aplica una cultura de reciclaje.

2.16. EL CULTIVO DE ARROZ EN LA AMAZONIA PERUANA

El cultivo de arroz es un cultivo tropical propicio para las regiones de San Martín y Yurimaguas debido a los regímenes de temperaturas altas y constantes durante todo el año. Se puede sembrar y cosechar hasta 2 veces por año (13 a 14 t/has). Este cultivo constituye una alternativa al cultivo de la hoja de coca, sin embargo algunos productores desconocen de las prácticas conservacionistas de las cuencas hídricas, contaminándolas y agotando algunas fuentes. Así también, los productores no cuentan con un plan de gestión de residuos de cosecha, se ha demostrado que la cascara contiene tras ser convertida en cenizas de 85 a 90% de silicio. Se propone el uso de la cascarilla de arroz para devolver el silicio absorbido por la planta durante su desarrollo, en forma de ceniza. El silicato orgánico puede ser aplicado como fertilizante en cultivos de plátanos y palma aceitera.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ZONA DE ESTUDIO

3.1.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Se evaluaron los residuos agrícolas de cinco sistemas de uso de tierra pertenecientes a las provincias de San Martín, Mariscal Cáceres y Lamas de la región San Martín, siendo la localidad de esta última provincia cercana al límite fronterizo con el departamento de Loreto. Los sistemas de uso de tierra evaluados se encuentran detallados en el Cuadro 1.

La producción de biochar se llevó a cabo en la Estación Experimental de Juan Bernito, perteneciente al Instituto de Cultivos Tropicales (ICT). La estación está geográficamente ubicada a 06°30'2.87" latitud sur y a 76°20'14.80" longitud oeste, en la provincia de San Martín, región de San Martín y a 360 metros sobre el nivel del mar.

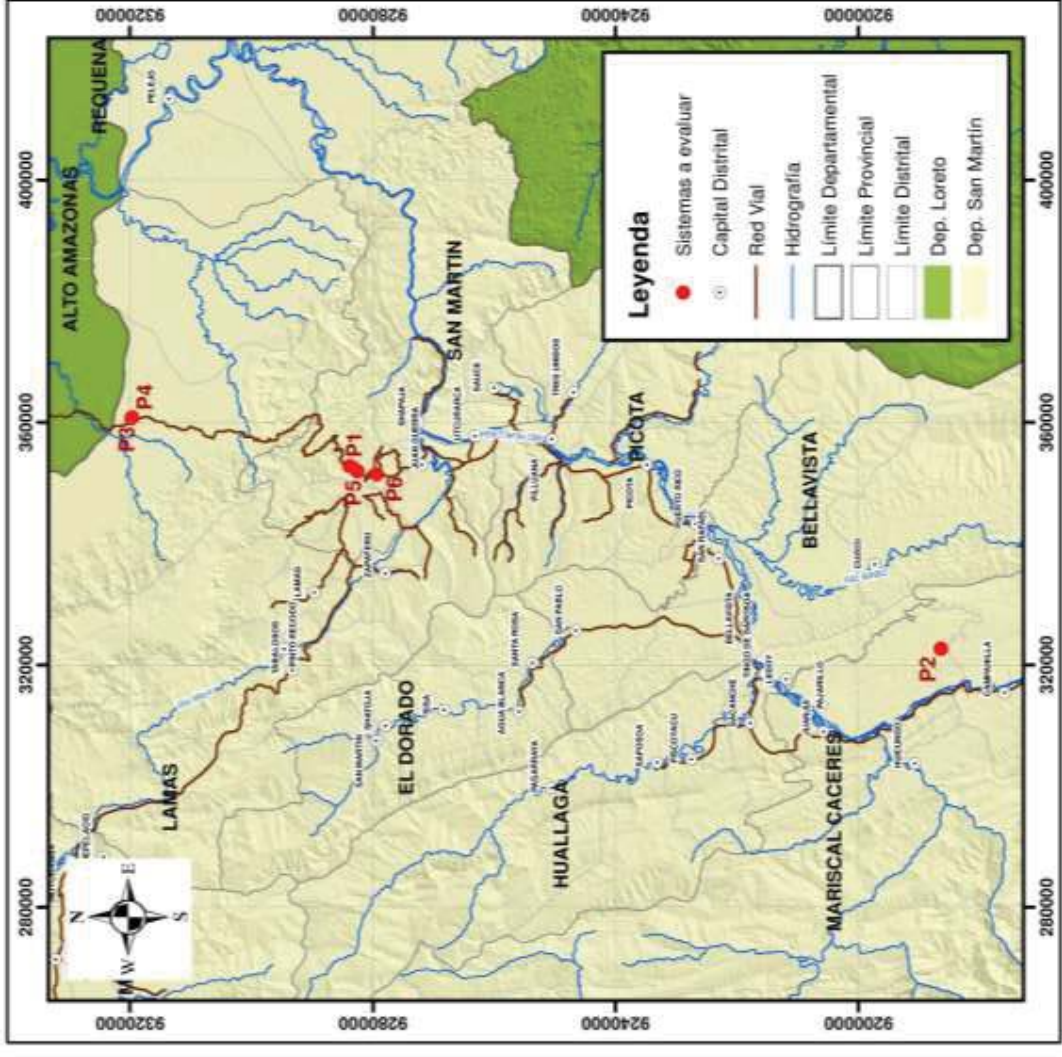
Los análisis experimentales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Análisis de suelos, plantas, aguas y Fertilizantes y en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos, ambos pertenecientes a la facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

La Figura 3 muestra la zona de estudio evaluada.

Cuadro 1: Descripción de los sistemas de uso de tierra evaluados.

Sistema	Edad (años)	Ubicación	Altitud (m.s.n.m)	Facilitador	Coordenadas UTM
Sistema Agroforestal de Cacao (<i>Theobroma cacao</i>) - Capirona (<i>Calycophyllum Spruceanum</i>) - Palipperro (<i>Vitex orinocensis var multiflora</i>) - Tornillo (<i>Cedrelinga cateniformis Ducke</i>)	35	Sector: E.E. El Choclimo Distrito: Banda del Shilcayo Provincia: San Martín	500-530	Ing. Abel Palomino (ICT)	0352800 E, 9283800 S
Sistema Agroforestal de Cacao (<i>Theobroma cacao</i>) - Capirona (<i>Calycophyllum Spruceanum</i>) - Guaba (<i>Inga edulis</i>)	6	Sector: Soledad Distrito: Pajarillo Provincia: Mariscal Cáceres	320	Ing. Esteban Altamirano (ICT)	0322696 E, 9186512 S
Sistema Agroforestal de Palma aceitera (<i>Elaeis guineensis</i>) - Kudzu (<i>Pueraria phaseoloides</i>)	7	Sector: La Alianza Distrito: Caynarachi Provincia: Lamas	180	Raimundi C. (IIAP)	0360880 E, 9319704 S
Cultivo de Palmito de Pijuayo (<i>Bactris gasipaes</i>)	23	Sector: La Alianza Distrito: Caynarachi Provincia: Lamas	180	Raimundi C. (IIAP)	0360675 E, 9319770 S
Cultivo de Arroz (<i>Oryza sativa</i>)	ND	Sector: La Banda Distrito: La Banda del Shilcayo Provincia: San Martín	265	Ing. Percy Díaz (IIAP)	0351460 E, 9279398 S
Cultivo de Sacha Inchi (<i>Plukenetia volubilis</i> Linneo)	ND	Sector: Victoria Distrito: La Banda del Shilcayo Provincia: San Martín	401	Ing. Percy Díaz (IIAP)	0352006 E, 9282514 S

Elaboración propia. Fuente: ICT e IIAP (2013). Entrevistas a los facilitadores. *ND: No Determinado.



PILOT	SISTEMA DE USO DE TIERRA	INSTITUCIÓN
P1	Sistema Agroforestal de cacao (Theobroma cacao)	ICT
P2	Sistema Agroforestal de cacao (Theobroma cacao)	ICT
P3	Asociación de palma (Elaeis guineensis) con tucos (guaraná y pasantoides)	IAP
P4	Cultivo de palma (Elaeis guineensis)	IAP
P5	Cultivo de cacao inchi (Plukenetia volubilis Linceo)	IAP
P6	Cultivo de améz (Oryza sativa)	IAP

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESPECIALIDAD DE INGENIERIA AMBIENTAL

TÍTULO: PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA A PARTIR DE LA BIOMASA RESIDUAL DE SISTEMAS AGROFORESTALES Y DE CULTIVOS CONVENCIONALES EN LA ANA-ZONA "REQUENA"

Proyección: UTM
 Datum Horizontal: WGS 84
 Escala numérica: 1:1 000 000

Elaborado por: Patricia Anielis Guerra Laura
 Fecha: 20/06/2014

Fuente: Geoservidor MIMM
 Datos colectados en campo

Figura 3: Mapa de ubicación de la zona evaluada.

3.1.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio oscila en elevación entre los 180 a 530 metros sobre el nivel del mar. La temperatura media anual es 27.3°C y se caracteriza por poseer un clima cálido y húmedo con lluvias regulares durante los meses de septiembre a abril y en menor intensidad durante los meses de mayo y junio y una estación seca principalmente entre los meses de julio y agosto (Gobierno Regional de San Martín 2009). El rango de precipitación al año se encuentra entre los 1094 y 1400 mm para la provincia de San Martín, 1100 a 1200 mm para la provincia de Lamas y para la provincia de Mariscal Cáceres. La temperatura promedio varía de 25°C a 35°C y la Humedad relativa oscila entre 73% a 80%, variando de acuerdo al ciclo de lluvia (Municipalidad Provincial de San Martín sf).

El suelo para la provincia de Lamas, cercana al límite departamental de Loreto, es un Ultisol típico, silicio Iso-hipertérmico. La textura del suelo es franco arenoso con un porcentaje de arcilla no mayor de 20% en los primeros 15 cm de profundidad. El nitrógeno y la materia orgánica son bajos con alta acidez y con bajos niveles de cationes y fósforo y alta saturación de aluminio. La provincia de San Martín presenta suelos menos evolucionados y más fértiles, del tipo entisoles y con una mayor predominancia de arcillas. De acuerdo a la capacidad del uso del suelo, la mayor parte de los suelos son de aptitud forestal y de protección (USDA 1993). Sin embargo, cabe mencionar que según la Zonificación Ecológica y Económica de la Región San Martín, en la zona de estudio existen áreas con aptitud para cultivos permanentes no utilizadas (Guzmán 2005).

3.1.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS EVALUADOS

Los cultivos de los Sistemas Agroforestales de los 60 genotipos de cacao y asociaciones forestales de la Estación Experimental “El Choclino” perteneciente al Instituto de Cultivo Tropicales (ICT) y localizado en la provincia de San Martín, son cultivos perennes permanentes con un crecimiento de tres años y con campañas manuales de cosecha de cada quince o treinta días. El establecimiento del Sistema se llevó a cabo sobre un bosque secundario de 25 años de edad, realizando un raleo selectivo de árboles de una densa vegetación para asegurar la sombra permanente de la plantación. Con respecto a su manejo, son cultivos orgánicos, sin aplicación de pesticidas y con curación manual de munilla, una enfermedad común de estos sistemas.

Por otro lado, las áreas destinadas para los cultivos de palma aceitera y palmito de pijuayo en la provincia de Lamas, distrito de Caynarachi, localidad de la Alianza, en el sector chupadero, fueron antiguas zonas de producción de hoja de coca. Sin embargo, desde mediados del año 1999 se introdujo en la zona el cultivo del palmito de pijuayo, un cultivo perenne de 18 meses de crecimiento, abarcando un aproximado de 4 hectáreas con 500 mil plantas cada. Con respecto a su manejo, se realizaron aplicaciones de herbicidas y fertilizantes (Magnecal y roca fosfórica) durante los tres primeros años y se realizan campañas manuales de cosecha cada quince o veinte días. Posterior a ello, el palmito es vendido a la Asociación de Productores de Palmito de La Alianza (Apropal S.A.) a una razón de S/. 0.50 por un tallo de 150 g. aproximadamente, a la fecha.

A diferencia del Palmito, el cultivo de palma aceitera es un cultivo relativamente nuevo en la zona de estudio. El establecimiento del cultivo se inició en el año 2006, con 3 años de crecimiento en campo y abarcando un total de 2.5 hectáreas con 143 plantas cada una. Con respecto a su manejo, la cosecha se realiza cada quince días y cada seis meses se aplican fertilizantes (Urea, Cloruro de Potasio, roca fosfórica).

Con respecto a los cultivos de arroz y sacha inchi, no se pudieron determinar sus características particulares de manejo debido a que el Instituto de Investigaciones de la Amazónicas Peruana (IIAP S.A.) facilitó la recolección de los residuos de cosecha de estos cultivos con empresas procesadores más no con asociaciones de agricultores.

3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1. MATERIALES DE CAMPO

Se utilizaron los siguientes materiales de campo: sacos de 50 kg, bolsas de papel de 13 x 20 cm con pestillos, hacha, machete, martillo, guantes de protección térmica, mascarilla de gases, ron de quemar, madera, hojarasca, fósforo, lapiceros, libreta de apuntes y cámara fotográfica.

3.2.2. MATERIALES DE LABORATORIO

Se utilizaron los siguientes materiales de laboratorio: set de tamices No. 20 (850um), No. 80 (180um) y No. 100 (150um) ASTM, bolsas Ziploc de polietileno, crisoles de porcelana con tapas de porcelana, desecador con silicagel, mortero de ágata con pilón de 100 ml, embudos de vidrio, cilindros graduados de 25 mL, vasos de precipitación de vidrio de 25 cm³, vidrio o luna de reloj, espátulas, cucharones de muestra, pinzas, tabla de picar, cuchillos, escobillas de limpieza, bandejas de plástico de 25 x 45 cm, solución de ácido clorhídrico al 0.03N, soluciones buffer de pH 4.00, 7.00 y 10.00, agua destilada, agua desionizada.

3.2.3. EQUIPOS DE CAMPO

Los equipos usados en campo fueron: horno pirolítico, termómetro digital infrarrojo Prasek de 550 °C, balanza romana de 25 kg de capacidad, cámara fotográfica.

3.2.4. EQUIPOS DE LABORATORIO

Los equipos usados en laboratorio fueron: molinos eléctricos Thomas – Wiley, modelos 2 y 4, compresor de aire, horno de estufa ($105 \pm 3^{\circ}\text{C}$), horno de mufla ($950 \pm 5^{\circ}\text{C}$), balanza analítica de 100 gr de capacidad y 0.1 mg de precisión, pH-metro digital con una precisión de ± 0.05 , placa caliente, analizador de COT Shimadzu L5000A.

3.3. METODOLOGÍA

3.3.1. SELECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Con las inspecciones hechas en campo se determinó y seleccionó la biomasa residual de cada sistema de uso de tierra seleccionado:

- Sistema Agroforestal de cultivo de cacao: **(i)** Cáscara de cacao del genotipo CCN-51.
La cáscara constituye el 80% del fruto del cacao y suele ser desechada en el campo.
- Sistema Agroforestal de cultivo de palma aceitera: **(ii)** Peciolo de la palma aceitera. **(iii)** hoja de la palma aceitera. Ambas materias primas son podadas durante la temporada de cosecha y son dejadas usualmente en el campo.
- Sistema Agroforestal con cultivo de palmito de pijuayo: **(iv)** corteza externa del palmito, **(v)** Raquis del palmito y **(vi)** corteza interna del palmito.
La corteza del palmito consiste en cuatro capas de protección del fruto: las tres últimas capas son las más externas y duras y son dejadas en el campo y la primera capa es la que envuelven el corazón del palmito y es llevada junto con el fruto a la industria Apropal S.A; una vez aprovechado el fruto, la corteza es desechada.
- Sistema de Manejo tradicional de cultivo de arroz: **(vii)** Cascarilla del arroz.
La cascarilla constituye aproximadamente el 20% en peso del grano y es separado en el proceso de pilado donde se forman grandes pilas de cascarilla al costado de los molinos.
- Sistema de Manejo tradicional de cultivo de sacha inchi: **(viii)** Cáscara de sacha inchi.
La semilla del sacha inchi está compuesta de 65 a 67 por ciento de almendra y de 33 a 35 por ciento de cáscara, siendo esta última desechada sin un uso posterior.

En la Figura 4 se aprecian los diferentes tipos seleccionados de materia prima.



Figura 4: Materias primas seleccionadas para la producción de biochar. a) Cáscara de cacao. b) Hoja de la palma aceitera. c) Peciolo de la palma aceitera. d) Corteza externa del palmito. e) Raquis de la hoja del palmito. f) Corteza interna de palmito. g) Cáscara de Sacha Inchi. h) Cascarilla de Arroz.

3.3.2. RECOLECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Terminado el ciclo de producción del cultivo y depositados los residuos en el campo, se tomaron muestras homogéneas de 50 a 100 kg por cada tipo de materia prima definida en la etapa de selección. La cantidad recolectada dependió del tipo, tamaño y volumen de la materia prima. Cada muestra fue obtenida directamente de una parcela escogida al azar mediante recolección manual.

Las muestras fueron obtenidas del Instituto de Cultivos Tropicales y del Fundo de La Soledad (cáscara de cacao del genotipo CCN 51); de los fundos del sector Chupadero del distrito de Caynarachi asociados con el Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana (raquis y corteza externa del palmito y hoja y peciolo de la palma aceitera); de la Asociación de Productores de Palmito de La Alianza S.A. (corteza interna del palmito); de la empresa Agroindustrias Amazónicas S.A. (cáscara de sachá inchi) y de la Molinera El Consentido S.A.C. (cascarilla de arroz).

3.3.3. ACONDICIONAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA

Las muestras recolectadas fueron dispuestas sobre calaminas y puestas a secar a temperatura ambiente, en un ambiente abierto y con techo para resguardarlas de las lluvias (Ver Figura 4). A la par se hizo un control diario del contenido de humedad debido a que diversos autores recomiendan que las muestras no deben presentar un porcentaje mayor al 10% de contenido de humedad (Bridgewater, Mohan citados por McElligott et al. 2011), caso contrario se requeriría una gran cantidad de energía para eliminar el contenido de humedad.

Particularmente, debido a un alto contenido de humedad, las muestras de cáscara de cacao fueron puestas a secar en un horno secador de muestras durante dos días en un rango de temperatura de 70 – 80 °C. Con respecto al resto de muestras puestas a secar al aire libre, el tiempo de secado dependió del estado de humedad de cada materia prima, no durando más de una semana de secado debido a que algunos residuos, como los del cultivo de palmito de pijuayo pueden presentar una velocidad de descomposición relativamente alta con liberación de nutrimentos (Soto et al. 2002).

Así también, para asegurar el completo nivel de pirolisis de las muestras, se fraccionaron aquellos materiales que presentaron un regular tamaño y dureza, particularmente en las muestras de peciolo de palma aceitera y en las muestras de cáscara de cacao.



Figura 5: Recolección y disposición de la materia prima. a) Recolección de los residuos de palmito (corteza externa y raquis). b) Puesta a secar de la corteza interna de palmito.

3.3.4. DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL HORNO PIROLÍTICO

La construcción del horno pirolítico se basó en el diseño común de dos tambores cilíndricos destinados para la producción de biochar en lotes de pequeñas cantidades para fines de análisis e investigación. El diseño se ajustó para las cantidades teóricas iniciales de biomasa y de producción de biochar y fue construido por la Empresa Construcciones Metálicas S.A. La figura 6 proporciona una imagen del dispositivo hecho en base a láminas de acero inoxidable.



Figura 6: Horno pirolítico de doble tambor para la producción de pirolisis lenta de biochar. Fuente: propia.

A continuación se detallan los componentes y dimensiones del Horno pirolítico:

- Un tambor cilíndrico vertical pequeño: representa la cámara interna del horno y sus dimensiones son de 40 cm de diámetro y 70 cm de alto, un volumen de 0.088 m³ y con una capacidad de 2 - 10 kg, dependiendo de la densidad de la biomasa. Alrededor de la sección superior del cilindro, se perforaron una serie de orificios pequeños destinados para una aireación/ventilación regulable y se perforó un único orificio en el centro de la base inferior del cilindro, para la liberación de energía concentrada dentro del tambor una vez iniciada la combustión.
- Un tambor cilíndrico grande: representa la cámara de combustión externa del horno y sus dimensiones son de 70 cm de diámetro y 100 cm de alto aprox. con un volumen de 0.385 m³. Se perforó una serie continua de orificios pequeños alrededor del tambor, en las partes media y superior y en la sección inferior se perforaron ventanas regulables para la ventilación del horno.

- Dos tapas de acero para cada tambor: una tapa totalmente sellada para la cámara interna y la tapa de la cámara o cilindro externo, acondicionada para la chimenea de ventilación de 20 cm de diámetro y 90 cm de alto.



Figura 7: Vista en planta de los dos tambores del horno pirolítico. Fuente: propia.

3.3.5. PRODUCCIÓN DE BIOCHAR

Cada muestra recolectada y parcialmente seca, fue mezclada y posteriormente separada en dos porciones equivalentes para su procesamiento en el horno pirolítico. A continuación se detallan los pasos:

- a) Para cada lote de producción de biochar se controlaron las entradas de aire en ambos tambores o cámaras puesto que el proceso de pirolisis se debe llevar a cabo en condiciones de entrada de oxígeno limitado. El principal control se llevó a cabo sobre la cámara interna debido a que es la cámara que lleva consigo las muestras y sobre la cual se realiza el proceso. El acondicionamiento de las entradas de aire se observa en la Figura 8a.
- b) Una vez seco el material (menor o igual al 50% de humedad inicial), se llenó por completo pero sin compactar el tambor interno con la biomasa seca. La cantidad dependió del tipo de materia prima empleado. Posteriormente se tapó el tambor y se invirtió para ser colocado dentro de la cámara o tambor externo, asegurando con

ello una salida y/o escape de gases generados por el proceso de pirolisis a través del orificio central. Ver Figuras 8b, 8c y 8d.

- c) El espacio libre comprendido entre los dos tambores fue llenado con materiales combustibles tales como leña, ramas, hojas secas, entre otros. Una vez completado todo el espacio libre, se les prendió fuego a los materiales y cuando las llamas empezaron a arder se colocó cuidadosamente la tapa de la cámara externa con la chimenea. Ver Figuras 8e, 8f, 8g y 8h.
- d) Durante el proceso de pirolisis se monitorizó constantemente la temperatura con un termómetro infrarrojo tanto en el tope o altura de la chimenea, en el medio y fondo del tambor externo. Ver Figuras 8i y 8j.
- e) El proceso de pirolisis, en promedio, duró un aproximado de 1.5 – 2 horas y el proceso de enfriamiento del sistema duró unas 3 horas posteriores. Finalmente se retiró la cámara interna conteniendo el biochar resultante. Ver Figuras 8k, 8l y 8m.

Con el primer lote de producción de biochar se determinó el rendimiento de la producción para cada tipo de biomasa seca utilizada y con ello se corroboró y aseguró la cantidad de materia seca por lote de producción, el tamaño de partícula idóneo y se verificaron los rangos de temperatura y el tiempo de producción para el segundo lote de producción. La relación de cantidad inicial y tamaño de biomasa destinada para la producción de biochar se puede observar en el Cuadro 3: Rendimientos en la producción de biochar de los diferentes tipos de materia prima.

En total, se obtuvieron 16 muestras de biochar. A continuación se detalla el proceso con imágenes.



Figura 8: Producción de biochar. a) Acondicionamiento de las entradas de aire del tambor externo. b) Llenado de la cámara interna con la biomasa seca. c) Cierre de la cámara interna. d) Ubicación de la cámara interna dentro de la cámara externa. e) y f) Acondicionamiento con leña y hojarasca en el espacio libre comprendido entre las dos cámaras. g) Inicio de la llama. h) Cierre del dispositivo. i) Inicio del proceso de pirolisis. j) Monitoreo de la temperatura. k) Cese de la producción de biochar. l) Extracción de la cámara interna. m) Biochar fácil de moler.

3.3.6. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

a) **Acondicionamiento de las muestras**

Para el acondicionamiento de las muestras se siguieron los lineamientos de la Norma ASTM E1757- 01(07): Standard Practice for Preparation of Biomass for Compositional Analysis.

- Secado: las muestras con un alto contenido de humedad teórico fueron secadas en una estufa a 105°C durante 12 horas y/o hasta lograr peso constante y las muestras que contenían un bajo porcentaje de humedad (cascarilla de arroz, cáscara de Sacha Inchi), fueron puestas a secar por 4 horas a la misma temperatura.
- Molienda: las muestras fueron sometidas a un proceso de molienda con un mini molino eléctrico Thomas – Wiley modelo 2, para reducir y estandarizar el tamaño de partículas a un tamaño inferior a 1 - 2 mm de diámetro.
- Tamizado: se tamizaron las muestras usando un set de tamices No. 20 (850um) y No. 80 (180um) ASTM. La fracción retenida en la malla del tamiz 20 (+20) volvió a ser reprocesada, mientras que la fracción retenida en la malla del tamiz 80 (-20/+80) fue pesada Wt20/80 y destinada para el análisis de composición. Por otro lado, el material retenido en el fondo del set (-80) resultó el más fino, se pesó Wt80 y se destinó para el análisis de cenizas.

Antes de cada prueba, las muestras fueron vueltas a secar a 100°C para que todos los resultados analíticos se reporten sobre una base seca o libre de humedad. En ningún caso, la masa de una muestra fue corregida por su contenido de humedad.

b) **Análisis próximo**

Se determinaron las siguientes propiedades proximales de la biomasa o materia prima:

- Contenido de humedad: para la determinación del contenido de humedad, expresado en porcentaje y considerado como la cantidad de masa perdida (fracción

líquida que se evapora) durante el secado de la muestra a 105 ± 3 °C hasta peso constante, se empleó la Norma ASTM E1756-08 (Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass).

- Contenido de material volátil: para la determinación del contenido de material volátil, expresado en porcentaje y considerado como la suma de materiales no biodegradables y biodegradables pero que no se degradan durante el tiempo de retención permitido para el compostaje pero que se volatilizan a dióxido de carbono y a otros gases cuando se combustiona a 550 °C, se empleó la Norma TMECC 05.01 (Biodegradable Volatile Solids) aplicable tanto para las materias primas del compost como para los productos del compostaje.
- Contenido de ceniza: para la determinación del contenido de ceniza, expresado como el porcentaje en masa de materia inorgánica o residuo mineral que queda luego de la oxidación seca de la biomasa a 575 ± 25 °C, se empleó la Norma ASTM E1755-01 (Standard Test Method for Ash in Biomass).

La normas ASTM E1756 y ASTM E1755 aplican para las siguientes biomásas: maderas duras y blandas, materiales herbáceos, residuos agrícolas (rastrajo de maíz, paja de trigo y bagazo), desechos de papel (residuos de oficina, cartón y papel de periódico), biomasa pre-tratada ácida y alcalina y la fracción sólida de los residuos de la fermentación.

c) **Análisis de macro - micronutrientes y de metal pesado**

Se determinaron los siguientes elementos constituyentes de la materia prima:

Cuadro 2: Relación de elementos constituyentes de la biomasa y metodología aplicada.

Macronutrientes	Método
Nitrógeno (N)	%, Método de Nitrógeno Total de Kjeldahl
Potasio (K)	%, Método de Potasio Total
Calcio (Ca)	%, Espectrofotometría de absorción atómica
Magnesio (Mg)	%, Espectrofotometría de absorción atómica
Fósforo (P)	%, Método de Fósforo Total

... continuación.

Azufre (S)	%, Método de Azufre Total
Macronutrientes	Método
Nitrógeno (N)	%, Método de Nitrógeno Total de Kjeldahl
Potasio (K)	%, Método de Potasio Total
Calcio (Ca)	%, Espectrofotometría de absorción atómica
Magnesio (Mg)	%, Espectrofotometría de absorción atómica
Fósforo (P)	%, Método de Fósforo Total
Azufre (S)	%, Método de Azufre Total
Micronutrientes	Método
Hierro (Fe)	ppm, Espectrofotometría de absorción atómica
Manganeso (Mn)	ppm, Espectrofotometría de absorción atómica
Zinc (Zn)	ppm, Espectrofotometría de absorción atómica
Boro (B)	ppm, Método de la Curcumina.
Cobre (Cu)	ppm, Espectrofotometría de absorción atómica
Sodio (Na)	ppm, Espectrofotometría de absorción atómica
Metal pesado	Método
Metal pesado	ppm, Espectrofotometría de absorción atómica.

El análisis de constituyentes de la biomasa o materia prima fue llevado a cabo por el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

3.3.7. CARACTERIZACIÓN DEL BIOCHAR

a) Acondicionamiento de las muestras

Para el acondicionamiento de las muestras se siguieron los lineamientos de *sample preparation* de la Norma ASTM D1762-84(07) (Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal) y de los procedimientos llevados a cabo en investigaciones consultadas.

- Molienda: las muestras se sometieron a un proceso de molienda suave con un mortero de porcelana. Se evitó una molienda excesiva para no producir una gran cantidad de partículas más finas que el tamiz No. 100 (150 um) ASTM y con ello evitar incurrir en errores durante la determinación del material volátil. Para el caso de las muestras de biochar de Sacha Inchi, además de utilizar el mortero, se usó un molino eléctrico Thomas - Wiley modelo 4, puesto que presentaba una estructura más difícil de moler. Para estos casos, se evitaron largos tiempos de molienda debido a que el calor generado podría provocar la pérdida de humedad y material volátil en las muestras.
- Tamizado: se tamizaron las muestras usando un set de tamices **No. 20** (850um), **No. 80** (180um) y **No. 100** (150um) ASTM. Las partículas retenidas en la malla del tamiz 20 (+20) no fue destinada a uso, la fracción retenida en la malla del tamiz 100 (-80/+100) fue pesada Wt80/100 y destinada para los análisis de composición y el material retenido en el fondo del set (-100) fue el más fino y no fue destinado para todos los análisis, al menos no para el análisis de volátiles.
- Secado: antes de cada prueba, las muestras fueron vueltas a secar a 105°C para que todos los resultados analíticos se reporten sobre una base seca o libre de humedad. En ningún caso, la masa de una muestra fue corregida por su contenido de humedad.

b) Análisis proximal

Se emplearon los lineamientos paralelos a los de la Norma ASTM D1762-84(07) (Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal). Se evaluaron las siguientes propiedades:

- Contenido de humedad: considerado como la cantidad de masa de agua perdida, asumiendo que este es el único material volátil presente en el carbón a los 105°C y es expresado como el porcentaje de agua con respecto a la muestra húmeda.

- Contenido de materia volátil/móvil: expresado el porcentaje de pérdida de masa, excluida la humedad y definido como la pérdida de masa del producto gaseoso y/o móvil.
- Contenido de ceniza: expresado como el porcentaje de residuo con respecto a la muestra seca inicial y considerado como la fracción del biochar libre de humedad que no es orgánica.
- Contenido de Carbono Fijo: El contenido de Carbono Fijo se determinó restando a 100 la suma de los porcentajes del material volátil y cenizas, todos referidos en base seca.

$$CF = 100 - (Vol + Cz)$$

CF = carbono Fijo expresado en porcentaje.

Vol = cantidad de Material Volátil expresada en porcentaje.

Cz = cantidad de Ceniza expresada en porcentaje.

c) Análisis de las propiedades físicas elementales

- Densidad aparente: Para la determinación de la densidad aparente se siguieron los lineamientos análogos de la norma ASTM D2854-09 (Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon) y del manual TMECC 03.03 (Test Method for the Examination of Composting and Compost - Bulk Density). Ambos con el mismo principio de determinación.

$$\text{Densidad Aparente recibida (g/mL)} = \text{masa del carbón (g)} / \text{Volumen del carbón ocupado (mL)}$$

$$\text{Densidad Aparente seca (g/mL)} = \text{Densidad Aparente recibida} \times [1 - (\text{CH\%/100})]$$

Las propiedades físicas: Porcentaje de espacio poroso, Volumen Total de Poros (ml/g) y área superficial BET (m²/g) no pudieron determinarse puesto que se requerían equipos y/o análisis especializados que no se hallan y/o realizan en el Perú.

d) Análisis de las propiedades químicas elementales:

- pH (1:20 y 1:10 sólido-líquido): Para la determinación del pH se siguieron los lineamientos análogos a la norma ASTM D1512-05 (Standard Test Methods for Carbon Black-pH Value) basado en el enfoque de humedecimiento del biochar (1:20) mediante calentamiento y a los propuestos por McLaughlin et al. (2010) sobre una solución simple de biochar – agua (1:10).
- Conductividad eléctrica o Sólidos Totales Disueltos (TDS): La determinación de esta propiedad fue realizada a la par de determinación del pH de las muestras.
- Carbono Orgánico Total (COT): La determinación se realizó mediante el analizador de COT Shimadzu L5000A, calcinando las muestras a 905 °C.
- Relación C/N: se calculó dicha relación mediante la determinación del contenido de Nitrógeno Total y del contenido de Carbono Orgánico de la biomasa, ambos expresados en porcentaje.

No se consideró la evaluación de la Capacidad de Intercambio Catiónico ni de la Acidez intercambiable del biochar.

e) Análisis de macro - micronutrientes y metal pesado

Al igual que las muestras de materia prima, se determinaron los mismos elementos constituyentes. Ver Cuadro 2.

f) Análisis del rendimiento del biochar

El rendimiento se calculó en base a la relación entre la cantidad o peso del producto final obtenido (biochar enfriado) y de la materia prima (biomasa seca) usada al inicio del proceso. La relación es expresada en porcentaje:

$$\text{Rendimiento} = (\text{Peso del biochar}/\text{peso de la biomasa seca}) \times 100$$

La Figura 9 muestra los principales análisis de laboratorio llevados a cabo.

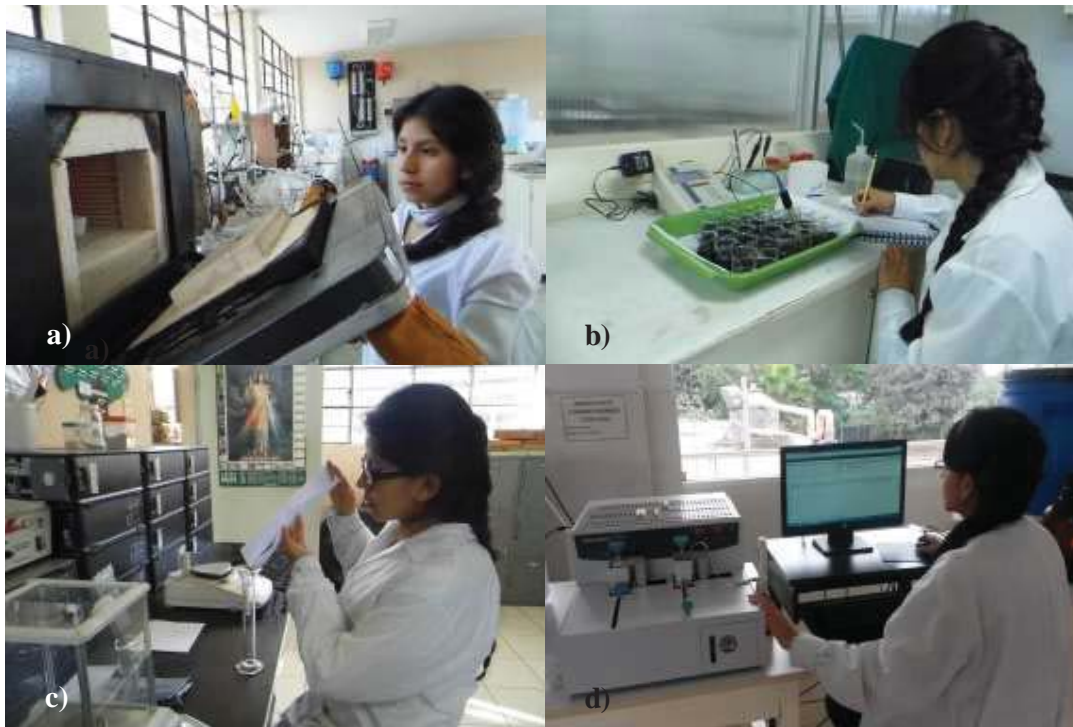


Figura 9: Análisis de laboratorio. a) Determinación del contenido de cenizas del biochar. b) Determinación del pH de biochar. c) Determinación de la densidad aparente del biochar. d) Determinación del Carbono Orgánico Total en el biochar.

3.3.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para la comparación de las propiedades y características de las muestras de biochar hechas en base a ocho tipos diferentes de materia prima se utilizó el análisis de variancias (ANOVA). Posteriormente se realizó la prueba de Tukey para comparar las medias de las propiedades determinadas de cada tipo de biochar. Así también, se realizaron pruebas de correlación simple, múltiple entre las variables y se realizaron análisis gráficos para comparar el comportamiento de la materia prima en las características del biochar.

Los cálculos se realizaron en el programa estadístico R.3.0.2 (R Core Team 2013).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PRODUCCIÓN DE BIOCHAR

Todas las muestras de biochar fueron producidas en un rango de 1.5 a 2.5 horas aplicando el proceso de pirólisis lenta en el horno pirolítico de doble barril diseñado para la producción en lotes de pequeñas cantidades con fines de investigación y análisis. Se monitoreó la temperatura durante todo el proceso con un termómetro Infrarrojo observando un rango de temperatura de 550 a 600 °C. Cada materia prima fue pirolizada en dos lotes.

Durante la producción, aproximadamente a unos 10-15 minutos de iniciado el fuego, el material combustible se encontró ardiendo, liberando una llama de color naranja (Ver Figura 10a). Posteriormente, abarcando el fuego sobre todo el contenido de material combustible del dispositivo, se liberó el contenido de humedad restante de la materia prima mediante vapor. La cantidad y el tiempo dependieron del contenido de humedad de cada materia prima al momento de iniciar el proceso de producción (Ver Figura 10b). Finalmente, dependiendo del contenido y cantidad, la biomasa ubicada en la cámara interna empezó a arder luego de unos 30 minutos aproximadamente de iniciado el proceso, a partir de este tiempo se liberaron gases condensables y no condensables y la flama se tornó de color azul acompañada de un menor humo, esta fue la señal que indicaba el inicio de una combustión incompleta (Ver Figura 10).



Figura 10: Control de humo en el proceso de pirólisis. a) Inicio del fuego. b) liberación del contenido de humedad y de otros gases. c) liberación de flama azul.

Las Figuras 11 a 18 exponen las muestras resultantes de biochar y en el Cuadro 3 y en el Anexo 2 se detallan los rendimientos alcanzados en la producción de biochar y los niveles de pirólisis de biochar obtenidos en cada lote de producción.



Figura 11: Muestras representativas de biochar de cáscara de cacao.



Figura 12: Muestras representativas de biochar de peciolo de palma aceitera.



Figura 13: Muestras representativas de biochar de hoja de palma aceitera.



Figura 14: Muestras representativas de biochar de la corteza externa del palmito.



Figura 15: Muestras representativas de biochar del raquis de la hoja del palmito.



Figura 16: Muestras representativas de biochar de cáscara de sachá inchi.



Figura 17: Muestras representativas de biochar de cascarilla de arroz.



Figura 18: Muestras representativas de biochar de la corteza interna del palmito.

De manera general, se observa que el biochar resultante conserva la forma y tamaño de su materia prima original.

Cuadro 3: Rendimientos en la producción de biochar de los diferentes tipos de materia prima.

Materia Prima	Biomasa (kg)	CH (%)	Biochar (kg)	Rend (%)	Tiempo (min)
Cacao					
L1 Cáscara	17.1	25.0	3.3	19.4	144
L2 Cáscara	15.3	28.0	4.1	26.8	94
Palma aceitera					
L1 Peciolo	11.5	33.8	2.1	18.3	118
L1 Hoja	2.5	11.0	1.2	47.4	118
L2 Peciolo	12.2	57.6	4.0	32.5	104
Palmito de Pijuayo					
L1 Corteza externa	12.0	64.8	2.2	18.6	96
L1 Raquis	2.5	47.0	0.5	19.6	96
L2 Corteza externa	11.5	70.5	2.1	18.4	89
L2 Raquis	1.5	50.6	0.2	16.0	89
Palmito de Pijuayo					
L1 Corteza interna	9.5	54.0	2.0	20.6	103
Sacha Inchi					
L1 Cáscara	24.0	12.8	8.9	37.1	109
L2 Cáscara	23.0	12.9	8.5	38.5	121
Arroz					
L1 Cascarilla	8.0	10.8	3.4	42.0	99
L2 Cascarilla	7.8	11.2	3.2	40.4	85

L1: Primer lote de producción.

L2: Segundo lote de producción.

En adición, junto con la producción de biochar, se observaron entre dos y tres niveles de pirólisis de las materias primas de cáscara de cacao, hoja y peciolo de la palma aceitera y corteza externa del palmito. Para todos los casos que apliquen, se excluye la cantidad de biochar ligeramente pirolizado en el cálculo del rendimiento de producción.

A continuación se describen los procesos de producción de biochar a partir de cada materia prima seleccionada:

- (i) Para cada lote de producción de biochar de cáscara de cacao se observaron tres niveles resultantes de pirólisis: total (78.6 %), parcial (14.3%) y ligeramente pirolizado (7.1%) para el primer lote y para el segundo lote: 57.9%, 22.1% y 20% respectivamente (Ver Figura 19).

Con la segunda producción se logró un mayor rendimiento (26.8 %) aunque con un mayor porcentaje de biochar parcial y ligeramente pirolizado debido al menor tiempo de conversión por el uso de una madera de menor poder calorífico (35.9 kg de madera blanca vs 48.5 kg de quinilla para la primera producción). En este caso el tiempo ha sido una variable determinante sobre el tamaño de partícula y el contenido de humedad de la materia prima.



Figura 19: Nivel de pirólisis del biochar de cáscara de cacao. a) Total. b) Parcial. c) Ligero.

Si la materia prima hubiese presentado un contenido de humedad nulo, el rendimiento en base a la cantidad real de biochar producido hubiese representado el 54.5% para el primer lote y 73.9 % para el segundo (Ver Anexo 2: Relación de variables sobre el nivel de pirólisis del biochar para cada tipo de materia prima).

- (ii) En la producción de biochar de peciolo de palma aceitera se observaron tres niveles de pirólisis más sólo para el primer lote de producción: total (38.6 %), parcial (32.5%) y ligeramente pirolizado (28.9%). En el segundo lote de producción se observaron dos niveles: total (65.7 %) y parcialmente pirolizado (34.3%). Ver Figura 20.

Se aprecia un mayor rendimiento en el segundo lote de producción de peciolo de palma y un mayor porcentaje de biochar totalmente pirolizado sobre el total producido. Se concluye que para un similar tiempo de producción y con una misma

cantidad de madera empleada (37 kg de quinilla), el contenido de humedad y el tamaño de partícula determinan el nivel de pirolisis del biochar resultante. Si la materia prima hubiese presentado un 0% de Contenido de Humedad, el rendimiento sería de 75.7% para el primer lote y 74.12% para el segundo lote.



Figura 20: Nivel de pirolisis del biochar de peciolo de palma aceitera. a) Total. b) Parcial. c) Ligeramente

- (iii) En la producción de biochar de hoja de palma aceitera se observaron dos niveles pirolisis: total (72.0 %) y ligeramente pirolizado (28.0 %). Ver Figura 21.

El rendimiento en la producción de biochar de hoja de palma aceitera fue de 47.4% para un contenido de humedad remanente de 11.0 %. Considerando el contenido de humedad teórico sobre el total de biochar producido, el rendimiento con un 0% de contenido de humedad, representaría un 54.33%.



Figura 21: Nivel de pirolisis del biochar de la hoja de palma aceitera. a) Total. b) Ligeramente

- (iv) En la producción de biochar de la corteza externa de palmito se observaron dos niveles de pirolisis en el primer lote de producción: total (57.4 %) y parcialmente pirolizado (42.6%), mientras que en el segundo lote de producción se obtuvo una total pirolisis, esto debido a que en el primero se empleó un mayor tamaño de partícula (Ver Figura 22).

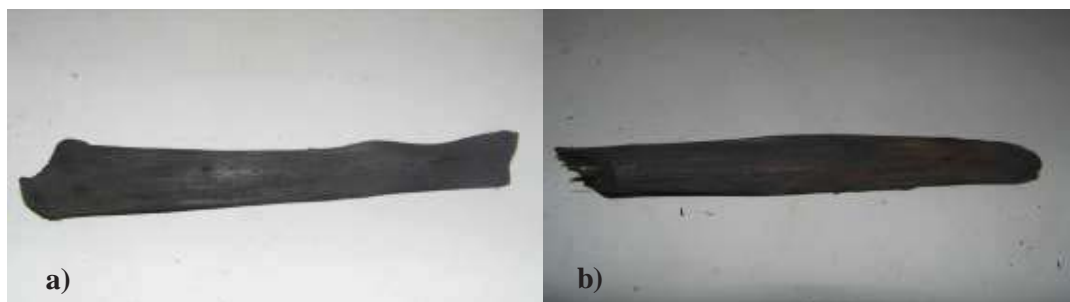


Figura 22: Nivel de pirolisis del biochar de la corteza externa del palmito. a) Total. b) Parcial.

En ambos lotes de producción de biochar se logró un rendimiento similar de 18.5% aproximadamente y esto debido al elevado contenido de humedad de las muestras. Si la materia prima hubiese presentado un 0% de Contenido de Humedad, el rendimiento en base a la cantidad real de biochar hubiese representado el 89.78% y 93.47%, respectivamente.

- (v) En la producción de biochar del raquis de palmito se observó una total pirolisis de las muestras en ambos lotes de producción, alcanzándose rendimientos de 19.60 % y 16.00%, respectivamente para un contenido de humedad remanente de la materia prima de 47.0% y 50.60%. Siendo el contenido de humedad teórico de 73.4%, el rendimiento esperado hubiese alcanzado niveles ligeramente mayores: 55.82% y 45.11 %. Se utilizaron 35.9 kg y 38 kg de madera quinilla.
- (vi) Para la producción de biochar de la corteza interna que rodea al fruto del palmito se logró una total pirolisis, alcanzándose un 20.63% de rendimiento para un contenido de humedad remanente de 54%. Se utilizaron 35.0 kg de madera quinilla para la producción.

(vii) En ambos lotes de producción de biochar de cascarilla de sachá inchi, se produjo un biochar totalmente pirolizado con rendimientos de producción de 37.1% y 38.5% para un contenido de humedad de 12.80% y 12.90%, respectivamente. Tratándose de una biomasa libre de humedad, los rendimientos representarían el 42.6% y 44.3%. Se utilizó un promedio de 39 kg de madera en ambos lotes de producción.

(viii) Al igual que el biochar de sachá inchi, se produjo un biochar de cascarilla de arroz totalmente pirolizado con rendimientos de producción de 42.0% y 40.4% para un contenido de humedad de 10.80% y 11.20%. Tratándose de una biomasa libre de humedad, los rendimientos representarían el 47.3% y 45.5%, respectivamente. Se utilizó un promedio de 36 kg de madera en ambos lotes de producción.

Se observan los mayores rendimientos de producción de biochar a partir de la cáscara de sachá inchi (37.8%) y de la cascarilla de arroz (41.2%). Esto debido a que son materias primas con un bajo contenido de humedad 12.85% y 11.0%, respectivamente y con un tamaño de partícula estándar fácil de pirolizar. Por otro lado, los rendimientos más bajos reportados pertenecen a la producción a partir de la cáscara de cacao, corteza interna, corteza externa y raquis del palmito, debido a que presentan contenidos de humedad elevados difíciles de manejar en condiciones de temperatura ambiente (84%, 82.4% y 73.4% respectivamente). Con respecto al peciolo de la palma aceitera, el tamaño y dureza de partícula resulta predominante sobre su contenido de humedad para obtener un biochar totalmente pirolizado.

En general, se comprueba que aquellas materias primas cuyos tamaños de partículas se consideran muy pequeños o frágiles (hoja de palma y cascarilla de arroz), no corren el riesgo de convertirse en ceniza durante el proceso de conversión termoquímica. Así también, es importante observar que aunque se traten de cantidades bajas de biochar producido: 0.2 – 8.9 kg frente a 1.5 – 24 kg de materia prima inicial, el biochar ocupa aproximadamente el 50% del volumen del horno debido a su baja densidad aparente.

Por otro lado, se presentaron diferentes niveles de conversión termoquímica final de la materia prima durante el proceso de pirolisis, en particular para aquellos materiales duros, de tamaño regular de partícula y elevado contenido de humedad: cáscara de cacao, peciolo de la palma aceitera y corteza externa del palmito. Se diferencian estos niveles (Total, parcial y ligero) por el hecho de que un buen biochar se caracteriza por ser un material rígido, que conserva su estructura externa pero que es fácil de moler. Así también no es particularmente grasoso al tacto y aunque este sucio y forme grandes cantidades de polvo negro estos son fáciles de remover.

4.2. PROPIEDADES POTENCIALES DEL BIOCHAR SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DE LOS SUELOS

Existe muy poca investigación sobre las propiedades y efectos del biochar sobre el suelo y cultivos en base a las materias primas seleccionadas en esta investigación. Sin embargo, se realizaron comparaciones con diferentes estudios de biochar hechos a base de madera de prosopis (Shembagavalli y Mahimairaja, 2012a); cáscara de maní, cáscara de pecana y grass (Noval et al., 2009); cáscara de coco, cascarilla de arroz (Shembagavalli y Mahimairaja, 2012b) y de cáscara de avellanas y maíz (Enders et al., 2012). A continuación se exponen las principales propiedades y características de los biochars producidos:

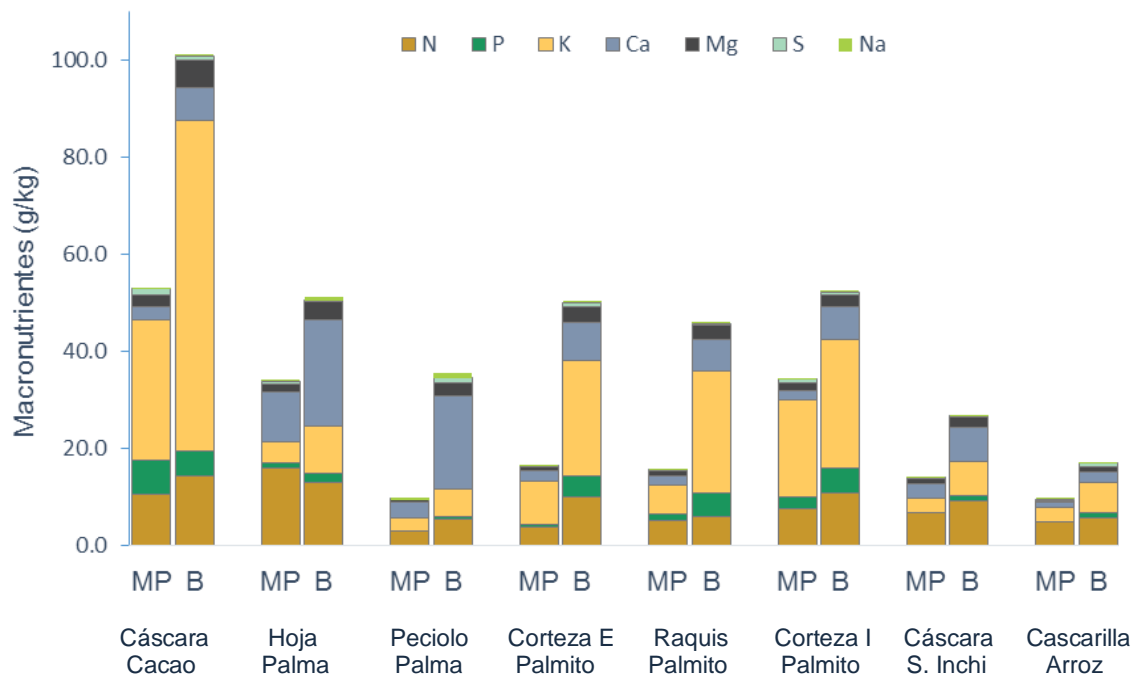


Figura 23: Relación de macronutrientes (g kg⁻¹) entre la materia prima (MP) y su respectivo biochar (B) producido a 550-600°C.

Se observa que el biochar se encuentra agotado ligeramente en Nitrógeno frente a otros nutrientes térmicamente más estables, esto debido a que durante el proceso de pirólisis, el calor generado ocasiona que algunos nutrientes se volatilicen y otros se concentren en el biochar resultante. Los biochars que presentan un mayor contenido de Nitrógeno son el de la cáscara de cacao (14.20 g kg⁻¹) y el de la hoja de palma aceitera (12.90 g kg⁻¹) debido a que son restos vegetales jóvenes (frutos y hojas) que suelen ser más ricos en nitrógeno en comparación con los restos vegetales más adultos (tallos): peciolo de la palma aceitera y raquis del palmito. El biochar de cascarilla de arroz es el que presenta el menor contenido de N (5.55%). Tanto el biochar de cáscara de sachá inchi y de cascarilla de arroz presentan el menor contenido de macro y micronutrientes mientras que el biochar de cáscara de cacao es el más enriquecido, con un alto contenido de Potasio.

Para la mayoría de los biochars el contenido de Potasio es significativamente mayor sobre el contenido de Nitrógeno y Fósforo ($K > N > P$), a excepción del biochar de peciolo y de hoja de palma cuyo contenido más elevado es el Calcio. En general los biochars tienen bajo contenido de Magnesio y Azufre y se encuentran agotados en Sodio.

El biochar de cáscara de cacao presenta el mayor contenido de nitrógeno (14.20 g kg⁻¹) y es el más enriquecido de todos los biochars producidos, siendo el Potasio su mayor constituyente (68 g kg⁻¹). En segundo lugar se ubica el biochar de corteza interna de palmito, con su mayor contribuyente el potasio (26.70 g kg⁻¹). Por otro lado, el biochar de cascarilla de arroz es el que presenta el menor contenido de N (5.55%) y presenta el menor contenido de macro y micronutrientes porque en su composición se encuentran principalmente constituyentes inorgánicos como el silicio.

Por otro lado, en el Cuadro 4 se muestra la relación de los micronutrientes del biochar y su respectiva materia prima.

Cuadro 4: Relación de constituyentes minerales (g kg⁻¹) y de metal pesado (mg kg⁻¹) del biochar y su respectiva materia prima.

Biochar	Tipo	Micronutrientes					Metal	
		Zn	Cu	Mn	Fe	B	Cd	
Cáscara de cacao	MP	0.047	0.011	0.014	0.100	0.057	0.0006	
	B	0.095	0.025	0.135	0.170	0.105	0.0014	
Hoja de palma	MP	0.026	0.008	0.639	0.163	0.012	0.0000	
	B	0.040	0.010	1.100	0.360	0.020	0.0002	
Pecíolo de palma	MP	0.008	0.005	0.127	0.055	0.004	0.0002	
	B	0.020	0.010	0.390	0.180	0.015	0.0003	
Corteza externa de palmito	MP	0.009	0.007	0.090	0.040	0.005	0.0002	
	B	0.030	0.015	0.200	0.130	0.020	0.0004	
Raquis de palmito	MP	0.015	0.006	0.077	0.068	0.004	0.0001	
	B	0.030	0.015	0.185	0.120	0.015	0.0002	
Corteza interna de palmito	MP	0.014	0.008	0.023	0.069	0.008	0.0000	
	B	0.040	0.015	0.100	0.355	0.015	0.0001	
Cáscara de Sacha Inchi	MP	0.028	0.010	0.025	0.102	0.013	0.0002	
	B	0.070	0.025	0.070	1.070	0.020	0.0001	
Casarilla de arroz	MP	0.019	0.005	0.170	0.251	0.007	0.0001	
	B	0.050	0.010	0.365	0.340	0.010	0.0005	

MP: Materia Prima.

B: Biochar.

El cadmio fue el único metal pesado determinado tanto en la materia prima como en las muestras de biochar puesto que es considerado como uno de los metales pesados más peligrosos para los animales y los seres humanos y debido a que en los estudios del Instituto de Cultivos Tropicales (2012) se observó su presencia tanto en el suelo como en los cultivos de cacao en la provincia de San Martín. Así también, debido a cuestiones de financiamiento limitado.

Los resultados muestran bajos contenidos de cadmio tanto en la materia prima como en el biochar, aunque de una manera más concentrada. Los valores se encuentran por debajo del umbral señalado por el US Composting Council y el US Department of Agriculture (2001): 1.4 – 39 mg/kg, cuyo rango también es considerado para el Product Testing Guidelines for

Biochar del International Biochar Initiative (2013). Por ende los valores de metal pesado no representan un problema para la adición de biochar en el suelo. Se recomienda evaluar la presencia de otros metales pesados tanto en la materia prima como en el biochar resultante.

Los resultados indican que el biochar presenta un mayor contenido tanto de nutrientes como de metal pesado con respecto a su biomasa originaria porque el biochar es un producto concentrado del proceso de conversión termoquímica de materia prima entrante por lote de producción. Sin embargo, de acuerdo a los resultados observados, presenta en general un relativo bajo contenido de nutrientes, cuyo aporte al suelo y a las plantas dependerá de las características del suelo y de la relación biochar – suelo. Para ello se deberá complementar con un estudio de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del biochar y de la CIC de biochar-suelo.

Por otro lado, cuando se evalúa la influencia del nivel de pirolisis sobre la composición de nutrientes del biochar (Ver Cuadro 5), se observa que en general el biochar totalmente pirolizado presenta un mayor contenido de elementos constituyentes.

Cuadro 5: Influencia del nivel de pirolisis sobre la composición de nutrientes del biochar resultante:

Biochar	Nivel	N	P	K	Ca	Mg	S	Na	Zn	Cu	Mn	Fe	B	Cd
Cáscara de cacao	Total	14.20	5.30	68.00	6.90	5.60	0.95	0.25	0.095	0.025	0.135	0.170	0.105	0.0014
	Parcial	14.00	2.45	56.75	6.00	4.10	1.20	0.20	0.087	0.024	0.120	0.097	0.079	0.0012
	Ligero	9.25	10.20	37.00	4.15	2.45	1.65	0.15	0.049	0.015	0.027	0.031	0.027	0.0006
Hoja de palma	Total	12.90	1.90	9.70	22.00	3.70	0.20	0.70	0.040	0.010	1.100	0.360	0.020	0.0002
	Ligero	14.90	0.90	3.80	8.50	1.50	0.50	0.20	0.019	0.005	0.448	0.213	0.010	0.0000
Peciolo de palma	Total	5.35	0.70	5.45	19.25	2.80	0.95	1.10	0.020	0.010	0.390	0.180	0.015	0.0003
	Parcial	3.40	0.70	3.40	10.20	1.85	0.60	1.05	0.014	0.008	0.231	0.162	0.011	0.0001
	Ligero	4.60	0.10	3.20	8.00	2.00	0.40	0.50	0.012	0.003	0.122	0.114	0.005	0.0000
Corteza externa palmito	Total	10.05	4.30	23.70	7.90	3.35	0.80	0.30	0.030	0.015	0.200	0.130	0.020	0.0004
	Parcial	9.20	5.50	7.80	2.70	1.20	0.60	0.10	0.011	0.006	0.072	0.034	0.010	0.0000

En las Figuras 24, 25 y 26 se presentan los resultados de las propiedades físico-químicas analizadas de los biochars derivados de 8 tipos de biomasas residuales.

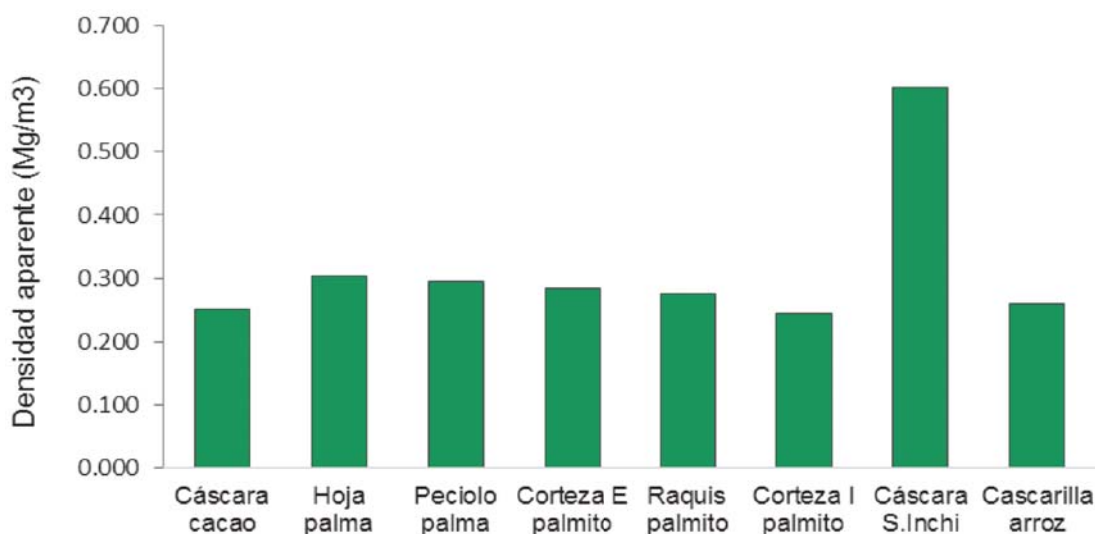


Figura 24: Densidad aparente de los biochars derivados de 8 tipos de biomasas residuales.

De acuerdo a los resultados observados, se observa una homogeneidad en los valores de densidad aparente de las muestras de biochar, con excepción del biochar de cáscara de sachá inchi, el cuál presenta el mayor valor de densidad aparente (0.603 Mg m^{-3}). Por otro lado, el biochar de la corteza interna de palmito presenta el valor más bajo (0.245 Mg m^{-3}) reportado sobre el total de muestras.

En general, la densidad aparente del biochar es baja y corresponde a lo indicado por McElligott et al. (2011) sobre las características comunes del biochar: una densidad promedio de 0.3 Mg m^{-3} . Esta baja densidad aparente se explica por la naturaleza porosa del biochar, pues presenta un amplio rango de tamaño de poros que dan como resultado una baja densidad aparente y una elevada área superficial. Por lo expuesto, se infiere que su aplicación puede reducir la densidad aparente total del suelo, un efecto deseable para el crecimiento de la mayoría de las plantas.

Con respecto a las propiedades químicas del biochar, de acuerdo a lo indicado en el sub capítulo 3.3. Metodología, se utilizaron dos metodologías para la medición del pH y Conductividad Eléctrica, la primera metodología (pH1, Mukherjee 2011) se basa en una

suspensión simple de biochar - agua y la segunda (pH2, ASTM D1512-05), en el calentamiento de la suspensión del biochar para promover la migración del vapor de agua hacia los poros. Se establecieron dos periodos de equilibrio: 1 hora para ambas y 12 horas para la primera.

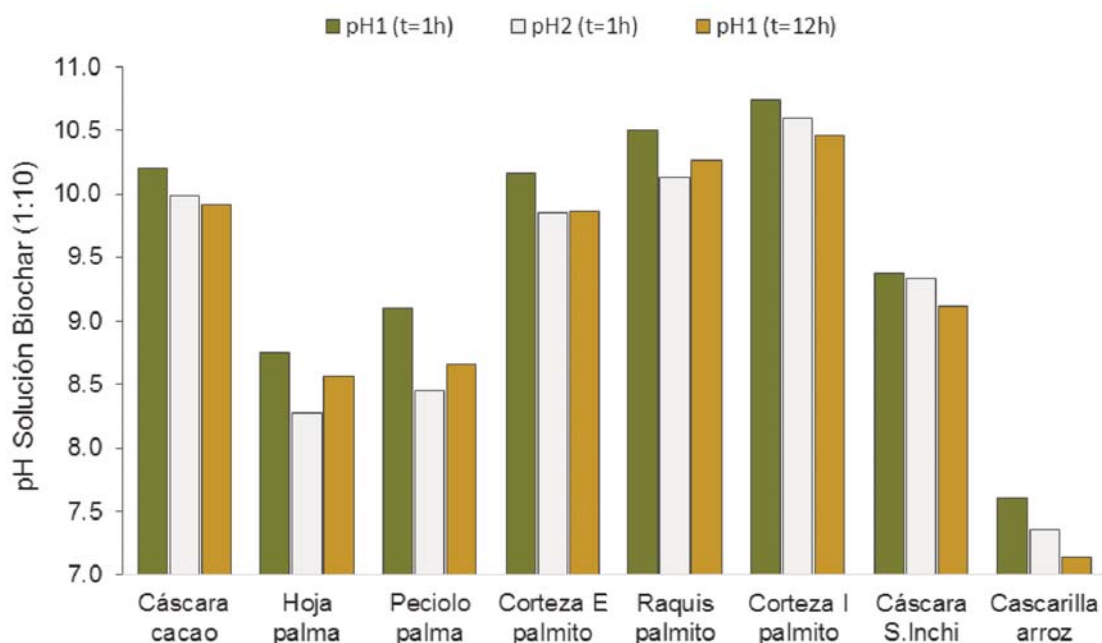


Figura 25: pH de la solución biochar en base a dos metodologías y dos tiempos de equilibrio.

Los valores de pH van acorde con la naturaleza encalante del biochar. De acuerdo a la Figura 25, el pH de todas las suspensiones de biochar - agua se encuentra por encima del pH neutro ($\text{pH} = 7.00$), siendo el más bajo el del biochar de cascarilla de arroz ($\text{pH} = 7.14$; $t = 12\text{h}$) y el más alto el de la corteza interna del palmito ($\text{pH} = 10.74$, $t = 1\text{h}$). El segundo valor más alto es el de la cáscara de cacao con un pH de 10.20 ($t = 1\text{h}$) y el tercer valor más alto pertenece al de la corteza interna del palmito con un pH de 9.37 ($t = 1\text{h}$).

Por otro lado, el pH del biochar es dependiente del tipo de materia prima empleada, de su composición y de las condiciones de pirólisis. La alta concentración de carbonatos de Potasio y en menor relación, de carbonatos de Calcio y Magnesio presentes en la materia prima y por ende, en el biochar, le otorgan el efecto de encalado sobre los suelos y con ello la posibilidad de influir sobre la fertilidad del suelo y de disminuir la saturación de aluminio, particularmente para suelos ácidos altamente meteorizados que presentan poca

capacidad de retención de nutrientes catiónicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , entre otros) y porque presentan comúnmente concentraciones altas de óxidos de hierro y aluminio, compuestos que tienen el potencial de atar el Fósforo, dejándolo no disponible para la planta y causando deficiencias.

Con la metodología 1, el pH inicial del biochar en la primera hora de equilibrio es mayor con respecto al pH luego de 12 horas de equilibrio; para todos los biochars se observa que el pH disminuye entre 0.19 a 0.47 unidades. Con la metodología 2 se observan también valores inferiores de pH con respecto a los valores obtenidos de la metodología 1 para el mismo tiempo de equilibrio (1 h) aunque no necesariamente inferiores al de los valores de la metodología 1 para 12 horas de equilibrio. Dos metodologías indican valores inferiores a los hallados inicialmente para una suspensión simple de biochar-agua (1:10).

En base a los resultados se considera que un periodo de equilibrio de 12 horas es más acertado para establecer el pH de la suspensión de biochar, por considerarse un tiempo de vida más representativo. Así también, con la metodología 2 (calentamiento de la suspensión) se asegura el total humedecimiento de la muestra de biochar, puesto que se promueve la migración del vapor de agua hacia los poros haciendo que los biochars microporosos se hundan y con ello se midan valores más representativos de pH, similares a los de metodología 1 para 12 horas de equilibrio.

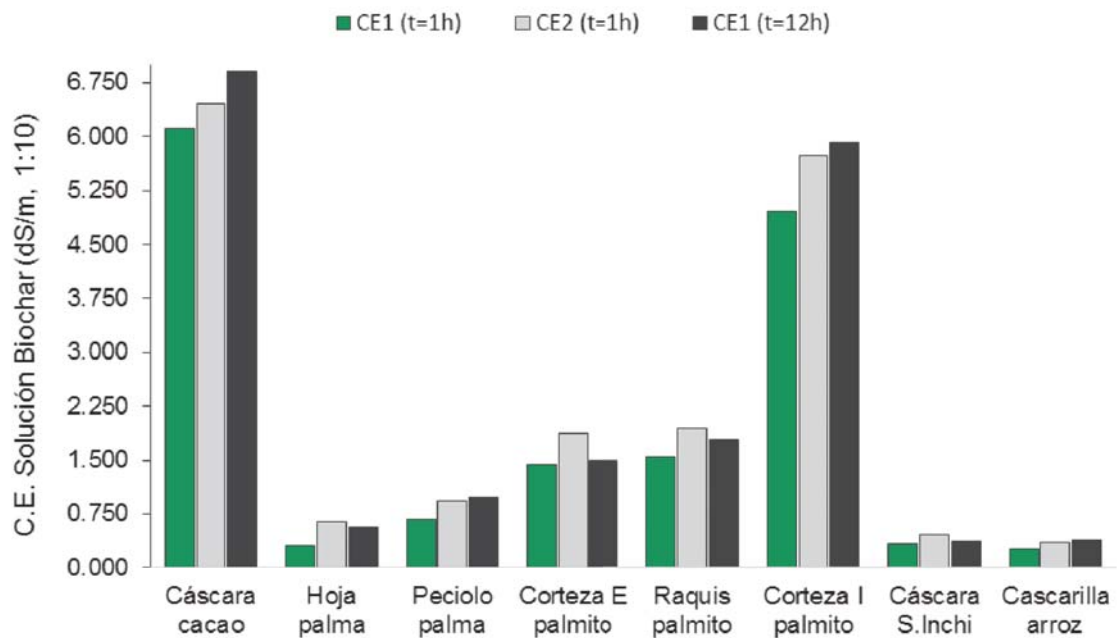


Figura 26: Conductividad Eléctrica de la solución de biochar (dS/m) en base a dos metodologías y dos tiempo de equilibrio.

Con respecto a la Conductividad Eléctrica, se observan valores extremos en la suspensión de biochar - agua: desde 0.252 (dSm⁻³) para la cascarilla de arroz hasta 6.915 (dSm⁻³) para la cáscara de cacao.

El biochar de cáscara de cacao presenta el mayor valor de Conductividad Eléctrica (6.915 dSm⁻³, t = 12 h) y este comportamiento se puede relativamente justificar puesto que es el segundo con el mayor contenido de cenizas (20.73%) y aunque no es un contenido elevado tienen una mayor probabilidad de elevar la CE. Un comportamiento similar se observa para el biochar de la corteza interna del palmito (5.915 dSm⁻³, t = 12 h) para un contenido de cenizas de 15.42%. Sin embargo, esto no se aprecia para el biochar de cascarilla de arroz, que presenta el valor más bajo de CE (0.252 dSm⁻³, t = 1h) y el valor más alto de contenido de cenizas (40.93%).

Los valores relativamente altos de Conductividad Eléctrica de la suspensión de biochar no resultan necesariamente un problema sobre el suelo, particularmente sobre zonas con constantes y abundantes lluvias que lavan permanentemente los suelos, tal es el caso de la

región de San Martín. Caso contrario la excesiva cantidad de sales tendría un efecto adverso en la mayoría de las plantas.

Los valores de pH y CE de la cáscara de sachá inchi (9.12 - 9.37 y 0.337 - 0.463 dS m⁻³) son similares a los valores reportados por Shenbagavalli y Mahimaraja (2012b) para la cáscara de maní y de coco (9.18, 0.73 dS m⁻³ y 9.30, 0.30 dS m⁻³, 1:5). Sin embargo, el pH de la paja de arroz para dicho estudio es el más elevado (9.68, 1:5) mientras que para esta investigación es el más bajo (7.14, 1:10).

Por otro lado, se observa la influencia del nivel de pirolisis sobre las propiedades físicas y químicas determinadas para este estudio en el Cuadro 6.

Cuadro 6: Influencia del nivel de pirolisis sobre las propiedades físicas y químicas del biochar.

Nivel de pirolisis	dap (Mg/m ³)	pH1 (1:10)	pH1 (1:10)	pH2 (1:10)	CE1 (dS/m)	CE1 (dS/m)	CE2 (dS/m)
Cáscara de cacao							
Total	0.251	10.20	9.91	9.99	6.113	6.915	6.458
Parcial	0.434	8.51	8.27	8.08	6.463	7.225	7.088
Ligera	0.446	5.14	4.89	4.87	7.528	7.985	7.903
Hoja de palma							
Total	0.304	8.76	8.57	8.28	0.315	0.569	0.635
Ligera	0.321	4.98	4.80	4.57	1.520	2.150	1.875
Pecíolo de palma							
Total	0.296	9.11	8.66	8.45	0.681	0.977	0.937
Parcial	0.346	8.01	7.63	7.33	1.183	1.535	1.405
Ligera	0.370	5.02	4.87	4.71	1.397	1.810	1.630
Corteza externa de palmito							
Total	0.283	10.16	9.86	9.85	1.442	1.500	1.880
Parcial	0.272	7.26	6.98	6.59	0.940	0.901	1.140

Por lo expuesto en el Cuadro 6, a medida que disminuye el nivel de pirolisis del biochar, las propiedades que lo caracterizan como una enmienda potencial resultan menos atractivas debido a que se incrementa paulatinamente la densidad aparente, disminuye el pH y aumenta la Conductividad Eléctrica de la suspensión biochar – agua.

Por otro lado, de acuerdo a lo observado en el Cuadro 7 y tal como se espera para el proceso de pirolisis, el contenido de Carbono Orgánico Total o COT del biochar, con respecto a su contenido total, es elevado. Esta es una característica importante del biochar con el que se decide sus beneficios para la agricultura pues tiene la capacidad de enriquecer el suelo con carbono orgánico, vinculándose con la cantidad y disponibilidad de nutrientes. Los valores más concentrados de Carbono Orgánico pertenecen al biochar hecho a base de la cáscara de sachá inchi (975.49 g kg⁻¹), raquis de palmito (901.77 g kg⁻¹) y peciolo de la palma aceitera (890.99 g kg⁻¹). Las cantidades más bajas fueron encontradas en el biochar de cascarilla de arroz (586.37 g kg⁻¹) y de cáscara de cacao (610.17 g kg⁻¹). Dicho rango de diferencias también se observa en el estudio de Shembagavalli y Mahimairaja (2012b): 540 – 940 g kg⁻¹ para la siguiente relación ascendente: cascarilla de arroz, fibra de coco, cáscara de maní, rastrojo de maíz, cáscara de coco y madera de prosopis.

Cuadro 7: Contenido de Materia Orgánica, Carbono Orgánico Total, Factor de conversión y relación C/N de los biochars resultantes:

Biochar	Materia Orgánica (g kg ⁻¹)	Carbono Orgánico Total (g kg ⁻¹)	Factor de conversión	C/N
Cáscara de cacao	801.09	610.17	1.31	43.31
Hoja de palma	844.91	767.12	1.10	59.47
Peciolo de palma	949.30	890.99	1.07	166.55
Corteza externa de palmito	938.20	883.98	1.06	88.02
Raquis de palmito	946.06	901.77	1.05	150.48
Corteza interna de palmito	873.15	841.75	1.04	76.53
Cáscara de Sachá Inchi	978.55	975.49	1.00	119.84
Cascarilla de arroz	666.70	586.37	1.14	108.18

Al igual que con el contenido de COT, también se observan valores altos de Materia Orgánica en el biochar, siguiendo la misma relación: los valores más altos para el biochar hecho a base de cáscara de sachá inchi (978.55 g kg⁻¹), raquis de palmito (946.06 g kg⁻¹) y peciolo de la palma aceitera (949.30 g kg⁻¹). Así también, las cantidades más bajas fueron encontradas en el biochar de cascarilla de arroz (667.70 g kg⁻¹) y cáscara de cacao (801.09 g kg⁻¹).

Por otro lado, en esta investigación, en base a los resultados obtenidos, se proponen los factores de conversión del porcentaje de Carbono orgánico del biochar para determinar el porcentaje de materia orgánica. En el Cuadro 7, se observa que los valores del factor de conversión fluctúan entre 1.00 y 1.31 y a continuación en la figura 27, se analiza la correlación del contenido de Carbono Orgánico Total y de Material Orgánica de los biochars resultantes.

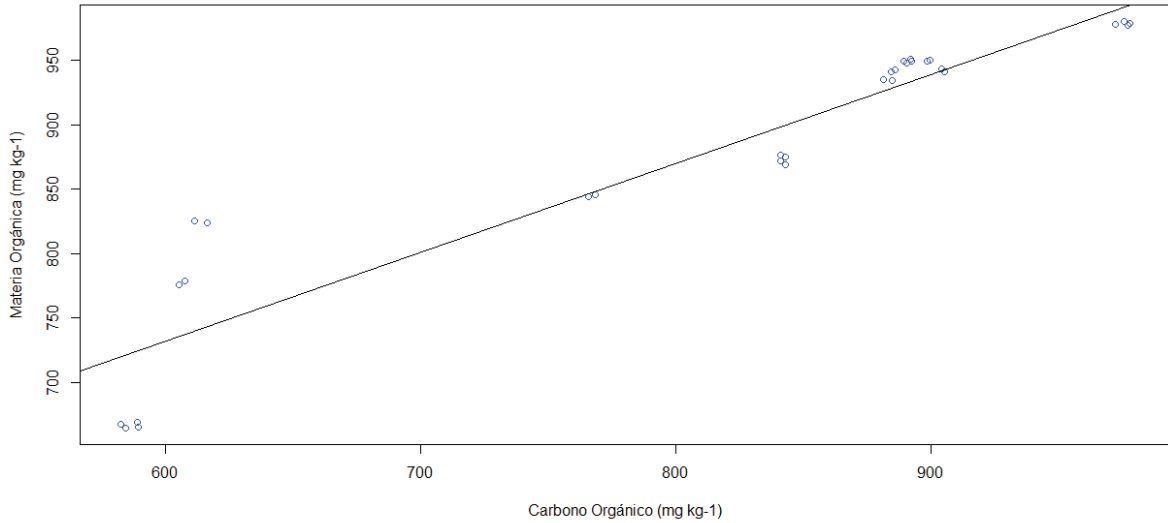


Figura 27: Correlación entre el contenido de Carbono Orgánico y el contenido de Materia Orgánica del biochar.

(Intercept)	COT
318.2647	0.6896

Multiple R-squared: 0.884, Adjusted R-squared: 0.8798
 F-statistic: 213.4 on 1 and 28 DF, p-value: 1.266e-14

Los resultados indican una correlación lineal directa con suficiente evidencia estadística para concluir que la variable Carbono Orgánico del biochar puede ser usada para predecir la Materia Orgánica del biochar (p-value ≈ 0).

Considerando un único factor de conversión aplicable para la determinación de la Materia Orgánica en el biochar, en base a los resultados, se propone el factor $F = 1.10$ ($DS = 0.0965$, $R^2 = 0.8906$). Resultando, la siguiente ecuación de conversión:

$$\text{Materia orgánica} = \text{Carbono Orgánico} \times 1.10$$

Finalmente, el biochar es un material agotado en nitrógeno y con un alto contenido de carbono que induce a una relación de C/N alta y única. El biochar del peciolo de palma aceitera es el que presenta el mayor valor de C/N (166.55), siguiéndolo el biochar de raquis de palmito (150.48) y el tercer lugar el de la cáscara de sachá inchi (119.84). Por otro lado, el menor valor pertenece al biochar de cáscara de cacao (43.31) y antes de él, la hoja de palma con una relación C/N de 59.47.

En el estudio de Shembagavalli y Mahimairaja (2012b), el rango de la relación C/N varía de 51.4 – 96.8 para el biochar de paja de arroz y el biochar de cáscara de coco y se reportan valores similares para el estudio de biochar de prosopis de Shembagavalli y Mahimairaja, (2012a). Por otro lado, McElligott et al. (2011), indica valores por encima de 400 para la relación C/N. Sin embargo no se observa dichos valores altos ni para los resultados de la investigación ni con los resultados de otras investigaciones consultadas.

4.3. POTENCIALIDAD DEL BIOCHAR COMO HERRAMIENTA DE CAPTURA DE CARBONO ATMOSFÉRICO

En general, la estructura del biochar no solo se encuentra conformada por una estructura recalcitrante de anillos aromáticos que enlazan fuertemente al carbono y que asocian dicha característica del biochar como una característica especial en la captura de carbono, sino también se encuentra conformada por una estructura más fácilmente degradable. Por ello, además del contenido de Carbono Fijo, se analizaron los contenidos de Material móvil y/o volátil y de Cenizas de la materia prima y de su respectivo biochar.

No existen estudios para los mismos tipos de materia prima empleados en esta investigación. Sin embargo se harán referencias de estudios enfocados en materias primas similares, los racimos vacíos del fruto de la palma aceitera (Azri Sukiran et al. 2011); cáscaras de nuez y de maní (Novak et al. 2009); grass y pino (Mukherjee et al. 2011).

Las figuras 28 y 29 contemplan los resultados del análisis próximo de los biochars derivados de ocho tipos de biomásas residuales.

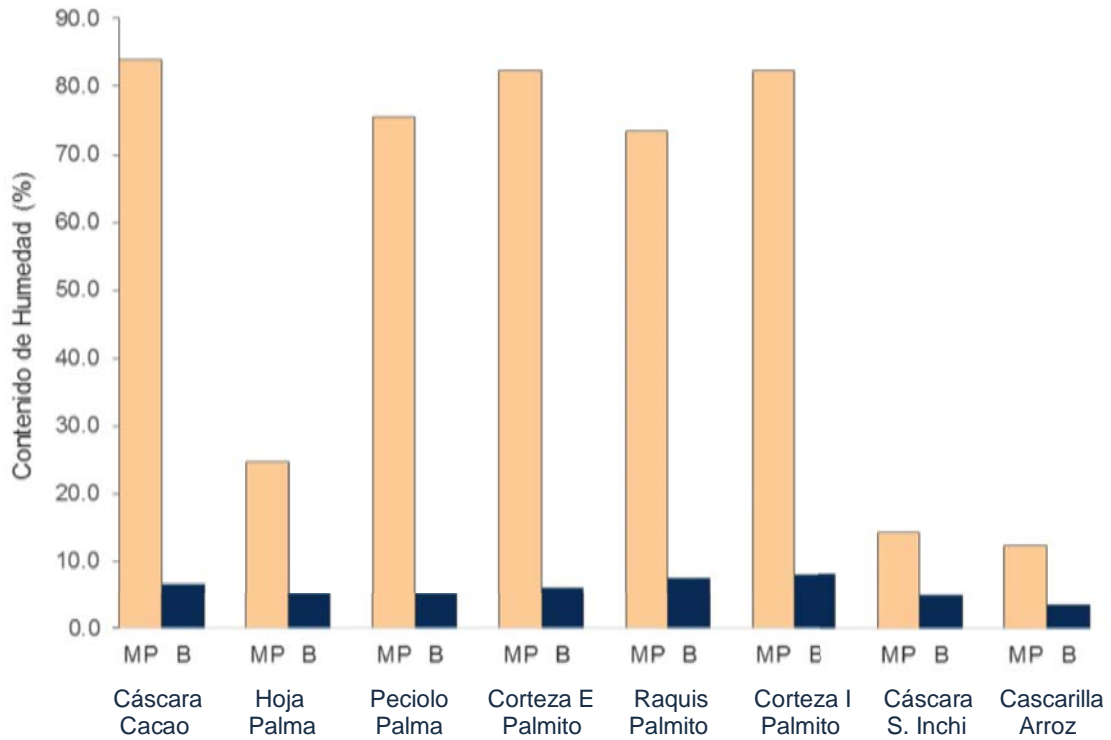


Figura 28: Relación del contenido de humedad de la materia prima y su respectivo biochar.

El biochar presenta un bajo contenido de humedad, inferior al 10%, con respecto a su materia prima originaria, siendo las materias primas de cáscara de cacao, corteza interna y corteza externa del palmito, las de mayor contenido de humedad (por encima del 80%).

En general, el contenido de humedad del biochar depende de su manejo y de las condiciones de su almacenamiento y transporte. Por otro lado, la cantidad de agua presente en el biochar dependerá del método utilizado para su determinación, en esta investigación se siguieron los lineamientos de la Normas ASTM, asumiendo que la cantidad de masa de agua perdida es el único material volátil a 105 °C.

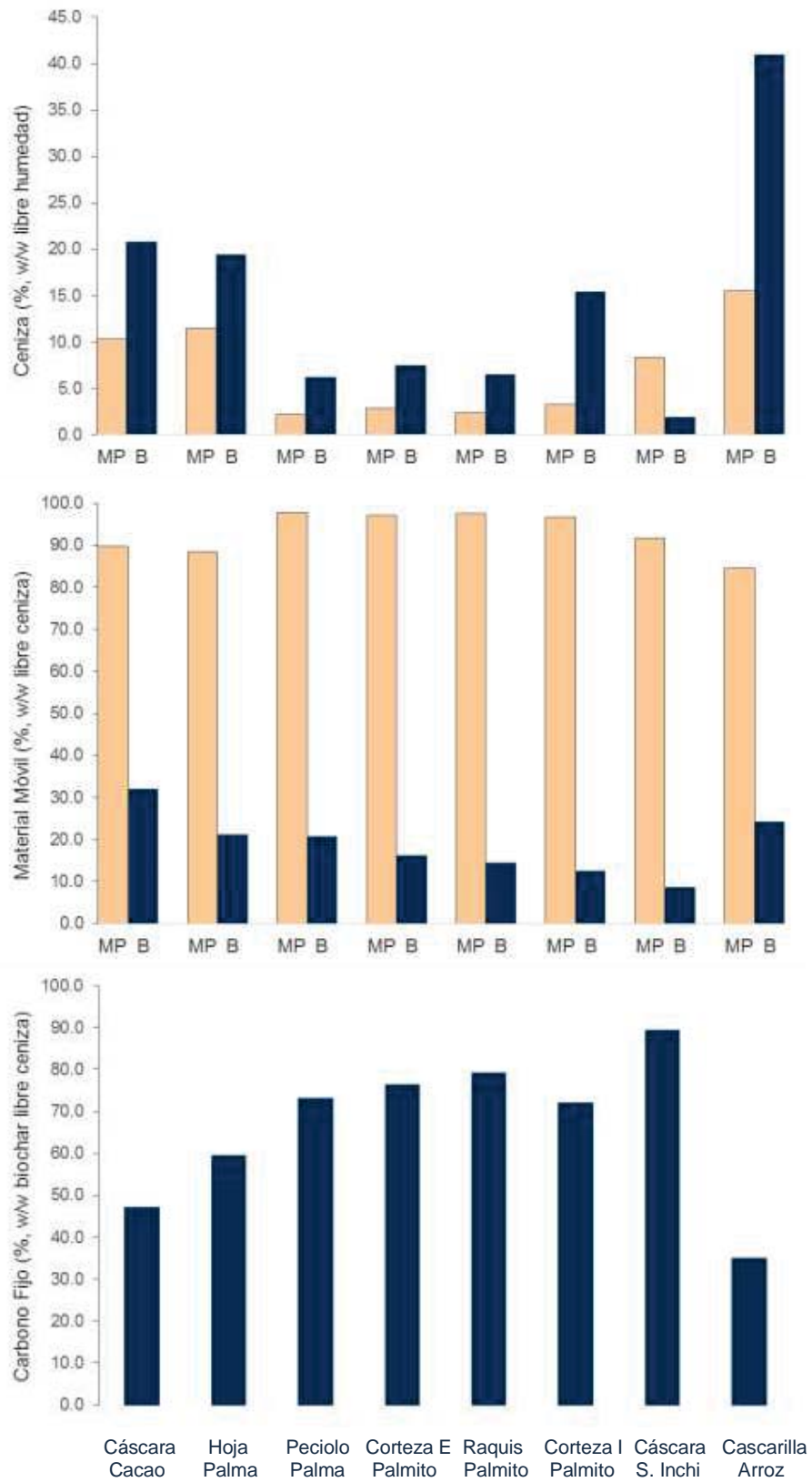


Figura 29: Relación del contenido del material móvil, cenizas y carbono fijo del biochar.

El contenido de cenizas presente en el biochar resultante representa su contenido de materia inorgánica, compuesto principalmente por compuestos de carbonatos de Potasio, Calcio y Magnesio y varía, en su mayoría, entre los diferentes tipos de materia prima empleados ($p = 0.0175$).

El biochar hecho a base de cáscara de sachá inchi, peciolo de palma aceitera, raquis y corteza externa de palmito presenta un contenido de cenizas inferior al 10%, siendo el biochar de cáscara de sachá inchi el del contenido más bajo (1.89%). Por otro lado se observó un elevado contenido de cenizas en el biochar de cascarilla de arroz (40.93%), y en menor proporción, en el biochar de cáscara de cacao (20.73%).

Particularmente, para el mismo tiempo y concluido el proceso de calcinación una vez obtenido un peso relativamente constante, las muestras de biochar de cascarilla de arroz indicaron presencia de material orgánico no incinerado (partículas negras entre las cenizas de la muestra de biochar). Ante ello, se consideró aumentar el tiempo de calcinación puesto que el proceso produce un material muy estable y no se ha evidenciado en la literatura un efecto perjudicial en el exceso de tiempo bajo límites de temperaturas controladas. Concluido el segundo tiempo de calcinación, se continuó observando la presencia de partículas negras en las muestras.

De acuerdo a la composición teórica de la cascarilla de arroz, y por ende del biochar resultante, este efecto podría deberse al elevado contenido de Silicio, un elemento que no sufre disociación ante la incineración de las muestras. Así también, de acuerdo a la temperatura de calcinación alcanzada (750 °C), se observaron en las cenizas de las muestras, diferentes rangos de coloración, indicando la presencia de óxidos de metal no identificable y esto debido a la conversión de los hidróxidos alcalinos y carbonatos presentes en las muestras. Por lo expuesto, se observa un efecto significativo del tipo de materia prima sobre el contenido de cenizas ($p\text{-value} = 0.02451$).

Por otro lado, el contenido de material móvil presente en el biochar hace referencia al contenido que se perderá por volatilización, lixiviación y/o degradación microbiana, una vez añadido en el suelo.

Todos los biochar resultantes presentan un contenido de material móvil inferior al 40%, siendo el biochar de cáscara de cacao el del más alto contenido de móviles (32.04%) y la cáscara de sachá inchi el del valor más bajo reportado (8.64%). De acuerdo a lo señalado anteriormente en los resultados, se observa un efecto significativo del tipo de materia prima sobre el contenido de material volátil ($p\text{-value} = 0.01758$)

De acuerdo a la bibliografía consultada, los estudios demuestran que en general, un biochar con un contenido de material móvil inferior al 80%, hace referencia a habilidades entre moderadas a elevadas de secuestro de carbono, considerando también las relaciones de O/C o de H/C, presentes en la composición del biochar. Un ratio de O/Corgánico > 0.2 y/o de un ratio H/Corgánico > 0.4 en el biochar, puede indicar una habilidad de secuestro moderada y un ratio de O/Corgánico < 0.2 y/o de H/Corgánico > 0.4 puede indicar un alto potencial de secuestro de carbono. Sin embargo, para esta investigación no se pudo determinar el contenido de Oxígeno y de Hidrógeno en el biochar debido a los elevados costos para los análisis elementales.

Con respecto al contenido de Carbono Fijo presente en el biochar, este representa al carbono residente que no se volatiliza a 950°C y que no se degrada en el suelo, al menos no para tiempos cortos, y por ende representa la potencialidad del biochar en la captura de carbono a través de una estructura recalcitrante de anillos aromáticos que lo enlazan fuertemente. Por ende, su adición en el suelo, bajo una forma más estable y menos degradable, a través del tiempo, podría representar un retorno lento de carbono a la atmósfera y por ende una herramienta en el secuestro de carbono. Sin embargo, para una mayor referencia sobre la potencialidad e idoneidad en el secuestro de carbono del biochar, es necesario saber, además de la cantidad, la tasa de degradación

El contenido de Carbono Fijo es relativamente alto para casi todos los biochars y se encuentra comprendido entre un rango de 34.92% a 89.47%. El biochar de cáscara de sachá inchi es el que presenta el mayor contenido de Carbono Fijo (89.47%), secundándolo el biochar de raquis de palmito (79.19%). Por otro lado los biochar de cascarilla de arroz y cáscara de cacao contienen menos del 50% de Carbono Fijo (34.92% y 47.22% respectivamente).

Existen diferencias entre los contenidos de material móvil, ceniza y Carbono Fijo del biochar de peciolo y de hoja de la palma y no guardan relación con lo reportado para los racimos vacíos del fruto de la palma aceitera: 81.9 %, 3.1%, 12.6% respectivamente (Azri Sukiran, 2011). Así también existen diferencias entre la corteza externa e interna del palmito (valores). Para la cascara de sachá inchi se aprecian valores similares de cenizas reportados por Novak et al. (2009): cáscara de nuez (5.2% a 700°C) y cáscara de maní (9.3% a 500°C).

Por otro lado, en la figura 30 se aprecia la relación del contenido de cenizas y el pH del biochar.

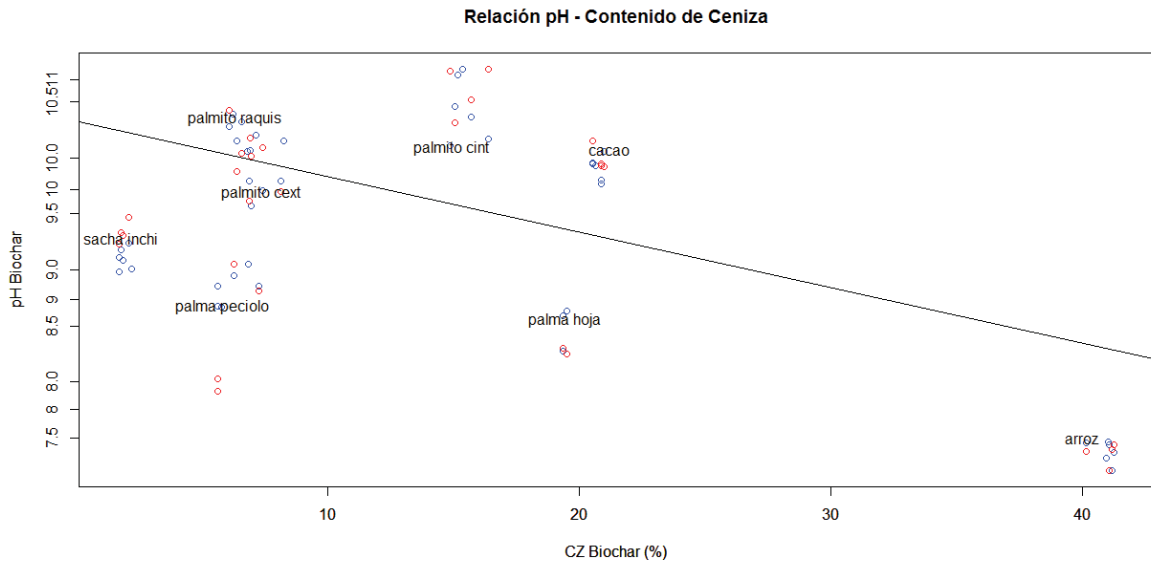


Figura 30 Relación del contenido de ceniza y pH del biochar.

Metodología 1:

Coefficients:
 (Intercept) CZ
 10.32886 -0.04957

Metodología 2:

Coefficients:
 (Intercept) CZ
 10.0008 -0.0474

Los resultados indican una relación dependiente e inversa entre el contenido de ceniza del biochar (CZ) y el pH de la solución resultante tanto para la metodología 1 (pH1) como para la metodología 2 (pH2).

Por otro lado, los valores del análisis próximo de cada biochar se ven afectados por su nivel de carbonización. Aumenta los contenidos de volátiles y cenizas y disminuye el contenido de Carbono Fijo del biochar (Ver cuadro 08).

Cuadro 08: Influencia del nivel de pirólisis (500-550°C) de biochar sobre el Análisis próximo.

Nivel de pirólisis	Humedad (%)	Material Móvil (%)	Ceniza (%)	Carbono Fijo (%)
Cáscara de cacao				
Total	6.61	32.04	20.73	47.22
Parcial	7.54	53.85	18.01	28.14
Ligera	5.85	67.76	24.08	8.16
Hoja de palma				
Total	5.07	21.14	19.40	59.45
Ligera	7.27	71.89	25.67	2.44
Pecíolo de palma				
Total	5.01	20.71	6.23	73.06
Parcial	5.35	36.03	8.87	55.10
Ligera	4.67	73.97	7.90	18.13
Corteza externa de palmito				
Total	6.17	16.19	7.46	76.35
Parcial	5.91	59.96	6.57	33.47

De todos los biochars analizados el biochar de cáscara de sachá inchi es el biochar que presenta el mayor rendimiento de producción y aunque presenta un bajo contenido de nutrientes y la más alta densidad aparente (0.603 Mg m⁻³) presenta el contenido de Materia Orgánica más alto (975.49 g kg⁻¹), un pH de su solución alto (9.37, t=1) y la más baja Conductividad Eléctrica (0.463 dS m⁻³). Así también el biochar de la corteza interna de palmito presenta características atractivas para su aplicación en los suelos de la región de San Martín: es el segundo biochar más enriquecido de nutrientes, con la densidad

aparente más baja (0.245 Mg m^{-3}) y el pH más elevado (10.74, $t=1\text{h}$). También, presenta un contenido de Materia Orgánica y una relación C/N ligeramente altos pero con valores de Conductividad Eléctrica cercanos a 6 dS m^{-3} , aunque dicho valor no representa gran inconveniente para los suelos de la región puesto que son constantemente lavados por las abundantes precipitaciones. Con estas características se espera que el biochar ayude a incrementar el pH de los suelos ácidos y de manera indirecta su Capacidad de Intercambio Catiónico, al igual que el contenido de Carbono Orgánico del Suelo (COS).

Los niveles de carbonización del biochar son determinantes en sus propiedades físicas y químicas. Un biochar que no haya sido totalmente pirolizado, presentará características menos idóneas para su uso en el suelo o para la captura de carbono atmosférico en el suelo.

V. CONCLUSIONES

1. Se diseñó un horno pirólítico de doble tambor con fines exclusivos de análisis e investigación para la producción de biochar de los diferentes tipos de materia prima. Con este prototipo se lograron rendimientos de 17.8 % (biochar del raquis de las hojas del palmito) a 41.2% (biochar de cascarilla de arroz). Siendo determinantes, además de las dimensiones del horno, los contenidos de humedad y el tamaño de partícula de las materias primas.
2. Se caracterizaron los biochars producidos de ocho materias primas diferentes de la región San Martín, pirolizadas por el mismo proceso, en el mismo reactor pirolítico y para el mismo rango de temperatura (550 - 600°C) y en un tiempo de residencia de 1.5 a 2 horas para obtener un conjunto mínimo de datos analíticos para su evaluación.
3. Todas las muestras de biochar tuvieron una mejor concentración elemental que sus respectivas materias primas originales, aunque las concentraciones de los nutrientes no resultan lo suficientemente altas como para promover su uso directo desde el punto de vista de aporte de nutrientes. Sin embargo, de acuerdo a sus características y propiedades físicas y químicas observadas: baja densidad aparente, elevado contenido de Materia Orgánica, elevado contenido de Carbono Orgánico Total, alta relación C/N, elevado pH de la solución de biochar y un rango de mediana a baja Conductividad Eléctrica, el biochar sí podría resultar importante como un condicionador del suelo y un promotor de las transformaciones de nutrientes para condiciones de suelo y clima específicos.

4. De lo anterior expuesto, aunque los biochars presenten un amplio rango de características que puedan mejorar la calidad del suelo, ningún biochar tienen un comportamiento igual y algunos serán más apropiados para ciertos entornos. Para el caso de la Amazonía Peruana, el biochar de cáscara de sachá inchi y el biochar de la corteza interna del palmito se presentan como los más idóneos para su aplicación en los suelos de la región.
5. De acuerdo a los resultados y a las investigaciones consultadas, el biochar de cáscara de sachá inchi y el biochar del raquis de las hojas del palmito contienen los valores más bajos de móviles y cenizas y por ende, los contenidos más altos de Carbono Fijo, pudiendo ser los agentes más efectivos en el secuestro de carbono cuando son aplicados en el suelo. Sin embargo, se requiere de un estudio más completo y de metodologías más detallados.
6. La producción de biochar puede considerarse como una estrategia adecuada para impulsar la agricultura en la Amazonía Peruana y plantear un nuevo modelo de agricultura sostenible puesto que se aprovecha la biomasa residual y presenta el potencial de mejorar la fertilidad del suelo y contribuir a disminuir su propia huella de Carbono mediante su captura y fijación en el suelo.

VI. RECOMENDACIONES

- Es necesario el empleo de un tipo de reactor que controle las tasas de calentamiento, temperatura y tiempo de la producción de biochar. Una mejor tecnología de producción aumenta el rendimiento de producción y evita un uso innecesario de biomasa combustible y por ende de emisiones significativas de humo. Caso contrario iría en contra de la propuesta de captura de carbono atmosférico del biochar. Así también, con una mejor tecnología se aprovecharían los coproductos del proceso de pirolisis, tal es el caso del uso del syngas como una fuente energética destinada para las cocinas o incluso para la realimentación del mismo proceso de pirolisis y evitar un mayor consumo de otros combustibles.
- Para la producción de biochar se recomienda el aprovechamiento de residuos frescos de las cosechas que suelen ser dejados en el campo, sin dejar de prestar atención al contenido de humedad y al contenido de metales pesados presentes. También se recomienda aprovechar una parte del total de los residuos puesto que cumplen con un ciclo de aporte lento de nutrientes al suelo una vez terminado el ciclo productivo del cultivo.
- Existe la posibilidad de mezclar diferentes tipos de materias primas para su respectiva pirolisis. Podrían adicionarse frondas (conjunto de hojas, ramas o follaje), troncos, residuos de especies leñosas (de árboles, arbustos y palmeras), hojarasca, raíces, ramas, etc. Todo dependerá de la calidad del biochar que se quiere obtener. Aunque es preferible el uso de maderas duras no resinosas frente a biomasa sin corteza y con tierra, por ello se recomiendan las distinciones pertinentes a la hora de seleccionar y recolectar los residuos.
- Es necesario establecer y manejar lineamientos estandarizados para el análisis de las características básicas del biochar puesto que se plantean diferentes metodologías ajustadas para cada investigación.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alegre, J; Arevalo, L; Ricse, A. s.f. Reservas de Carbono según el uso de la tierra en dos sitios de la Amazonía Peruana (en línea). Presentado en Conferencia de Agroforestería para la producción animal en América Latina - II, FAO. Consultado 20 feb. 2013. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/006/Y4435S/y4435s0a.htm#TopOfPage>.

Alvum-Toll, K; Karlsson, T; Ström, H. 2011. Biochar as soil amendment - A comparison between plant materials for biochar production from three regions in Kenya. Degree project in Biology. Uppsala, SE, Swedish University of Agricultural Sciences. 74 p.

ASTM (American Society for Testing and Material, US). 1984. ASTM Standard D1762-84 Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal (Reapproved 2007).

ASTM (American Society for Testing and Material, US). 2001. ASTM Standard E1755-01 Standard Test Method for Ash in Biomass (Reapproved 2007).

ASTM (American Society for Testing and Material, US). 2005. ASTM Standard D1512-05 Standard Test Methods for Carbon Black-pH Value (Reapproved 2012).

ASTM (American Society for Testing and Material, US). 2008. ASTM Standard E1756-08, Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass.

ASTM (American Society for Testing and Material, US). 2009. ASTM Standard D2854-09, Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon.

- Azri Sukiran, M; Kheang, LS; Abu Bakar, N; May, CY.** 2011. Production and Characterization of Bio-Char from the Pyrolysis of Empty Fruit Bunches. *American Journal of Applied Sciences* 8(10): 984–988.
- Brewer, CE.** 2012. Biochar characterization and engineering. Ph.D. Thesis. US, Iowa State University. 197 p.
- Brownsort, PA.** 2009. Biomass pyrolysis processes: performance parameters and their influence on biochar system benefits. Mag. Sc. Thesis. UK, University of Edinburgh. 93 p.
- Callo Concha, DA.** 2011. Cuantificación de carbono secuestrado por algunos sistemas agroforestales y testigos en tres pisos ecológicos de la Amazonía del Perú. Tesis Mag. Sc. México, Universidad Autónoma de Chapingo. 72 p.
- Cerrón Gamarra, Gabriel.** 2012. Asistencia técnica dirigida en manejo de cultivo de cacao (en línea). Guía Técnica. s.n.t. Perú, Agrobanco. 38 p. Consultado 08 jun. 2014. Disponible en <http://www.agrobanco.com.pe/data/uploads/ctecnica/010-f-cacao.pdf>
- Cueva Benavides, A.** 2013. Producción orgánica en la pequeña agricultura peruana: caso café y cacao en San Martín, liderando el comercio orgánico. Tarapoto, Perú, Universidad Nacional de San Martín. Consultado 12 jun. 2014. Disponible en <http://www.unsm.edu.pe/articulos.php?idarticulo=34>
- Deal, C; Brewer, CE; Brown, RC; Okure, MAE; Amoding, A.** 2012. Comparison of kiln-derived and gasifier-derived biochars as soil amendments in the humid tropics. *Biomass and Bioenergy* 37:161–168.
- Enders, A; Hanley, K; Whitman, T; Joseph, S; Lehmann, J.** 2012. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology* 114: 644-653.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, IT).** 2006. World reference base for soil resources 2006: a framework for international classification, correlation and communication. 2006 ed. Roma, WRB. 128 p.

- Glaser, B; Birk, JJ.** 2012. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (*terra preta de Índio*). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 82: 39–51.
- Gobierno Regional de San Martín, PE.** 2009. Sistema de Información Ambiental. Consultado 01 jun. 2014. Disponible en <http://www.regionsanmartin.gob.pe/>
- Gómez, A; Klose, W; Rincón, S.** 2008. Pirólisis de Biomasa - Cuesco de Palma de Aceite (en línea). Alemania, Universidad de Kassel. Consultado 07 mar. 2013. Disponible en <http://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-457-8.volltext.frei.pdf>
- Hale, SE; Alling, V; Martinsen, V; Mulder, J; Breedveld, GD; Cornelissen, G.** 2013. The sorption and desorption of phosphate-P, ammonium-N and nitrate-N in cacao shell and corn cob biochars. *Chemosphere* jan. 2013: 1-8
- IBI (International Biochar Initiative).** 2013. Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil (en línea). Versión 1.1. Consultado 03 mar. 2014. Disponible en <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard>
- ICT (Instituto de Cultivos Tropicales, PE).** 2012. Diagnóstico del análisis de metales pesados asociados a la fertilidad de suelos del cultivo de cacao (*Theobroma cacao l.*) en el departamento de San Martín. Perú.
- Jones, DL; Edwards-Jones, G; Murphy, DV.** 2011. Biochar mediated alterations in herbicide breakdown and leaching in soil. *Soil Biology & Biochemistry* 43: 804–813.
- Laird, D; Rogovska, N; Cruse, R; Fleming, P; Parkin, T; Meek, D.** 2011. Impact of Biochar on Manure Carbon Stabilization and Greenhouse Gas Emissions. *Soil Biology & Biochemistry* 75 (3): 871–879.
- Lehmann, J; Joseph, S.** 2009. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Sterling, London, Earthscan. p. 1-9.

- Lehmann, J; Rillig, MC; Thies, J; Masiello, CA; Hockaday, WC; Crowley, D.** 2011. Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology & Biochemistry* 43: 1812–1836.
- Maia, CMBF; Madari, BE; Novotny, EH.** 2011. Advances in Biochar Research in Brazil. *Dynamic Soils, Dynamic Plant* 5(1): 53–58.
- 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. Rocky Mountain Research Station-Research Note 46: 1-14.
- McLaughlin, H; Anderson, PS; Shields, FE; Reed, TB.** 2009. All Biochars are not Created Equal and How to Tell them Apart, in: 2. Presented at the North America Biochar Conference, Boulder, Colorado, p. 36.
- Minpimentel.** 2009. Resumen Ejecutivo del EIA del Proyecto Línea de Transmisión Eléctrica Tarapoto - Yurimaguas. Perú. 30 p.
- Municipalidad de Caynarachi, PE.** 2011. El clima (en línea). Consultado 11 Nov. 2013. Disponible <http://caynarachi.sm.md.gob.pe>.
- Municipalidad provincial de san Martín, PE. s.f.** Plan de desarrollo urbano de la ciudad de Tarapoto. Capítulo III: Diagnóstico y Análisis Urbano. Consultado 03 jun. 2014. Disponible en http://www.mpsm.gob.pe/architrans/EDICION_FINAL_PDU/DIAGNOSTICO_VOL_I/CAPITULO_III.1.pdf
- Mukherjee, A; Zimmerman, AR; Harris, W.** 2011. Surface chemistry variation among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma* 163: 247-255.
- Novak, J; Lima, I; Gaskin, J.** 2009. Characterization of designed biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. Massachusetts, US, Northeastern University: p 195-206.

- Ozçimen, D; Ersoy-Meriçboyu, A.** 2010. Characterization of biochar and bio-oil samples obtained from carbonization of various biomass materials. *Renewable Energy* 35: 1319-1324.
- Oleszczuk, P; Hale, SE; Lehmann, J; Cornelissen, G.** 2012. Activated carbon and biochar amendments decrease pore-water concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sewage sludge. *Bioresource Technology* 111: 84–91.
- Programa para el Desarrollo de la Amazonía (PROAMAZONIA, PE).** 2003. Caracterización de las zonas productoras de cacao en el Perú y su competitividad (en línea). Perú. Consultado 15 jun. 2014. Disponible en http://agroaldia.minag.gob.pe/biblioteca/download/pdf/manuales-boletines/cacao/cacao_completo.pdf
- R Foundation for Statistical Computing.** 2013. R: A language and environment for statistical computing. Consultado 10 mayo 2014. Disponible en <http://www.R-project.org/>.
- Rodriguez Achung, F.** 1995. El recurso del suelo en la Amazonía Peruana, diagnóstico para su investigación (Segunda aproximación). Documento técnico N° 14. Iquitos, Perú, IIAP. 59 p.
- Shenbagavalli, S., Mahimairaja, S.** 2012a. Production and characterization of biochar from different biological wastes. *International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciencies* 2: 197–201.
- Shenbagavalli, S., Mahimairaja, S.** 2012b. Characterization and effect of biochar on Nitrogen and Carbon dynamics in soil. *International Journal of Advanced Biological Research* 2: 249–255.
- Stockmann, U; Adams, MA; Crawford, JW; Field, DJ; Henakaarchchi, N; Jenkins, M; Minasny, B; McBratney, AB; Des Courcelles, V. de R; Singh, K; Wheeler, I; Abbott, L; Angers, DA; Baldock, J; Bird, M; Brookes, PC; Chenu, C; Jastrow, JD; Lal, R; Lehmann, J; O'Donnell, AG; Parton, WJ; Whitehead, D; Zimmermann, M.** 2013. The knowns, known unknowns and unknowns of

sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 164: 80–99.

UNALM. (Universidad Nacional Agraria La Molina, PE). 2009. Reglamento de tesis (en línea). Consultado 04 feb. 2013. Disponible en http://www.lamolina.edu.pe/vice_acad/index.asp

Uchimiya, M; Klasson, KT; Wartelle, LH; Lima, IM. 2011. Influence of soil properties on heavy metal sequestration by biochar amendment: 1. Copper sorption isotherms and the release of cations. *Chemosphere* 82: 1431–1437.

US Composting Council. 2001. Test Method for the Examination of Composting and Compost 03.03-1 Bulk Density.

US Composting Council. 2001. Test Method for the Examination of Composting and Compost 04.01-1 Organic Carbon.

US Composting Council. 2001. Test Method for the Examination of Composting and Compost 04.08-1 Inorganic Carbon.

US Composting Council. 2001. Test Method for the Examination of Composting and Compost 05.01-1 Biodegradable Volatile Solids.

Valverde, A; Sarria, B; Monteagudo, J. 2007. Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz (en línea). Colombia, Universidad Tecnológica de Pereira. Consultado 15 mayo 2014. Disponible en <http://www.slideshare.net/segundocorreamorán/cascarilla-de-arroz>.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: BASE DE DATOS

código	descripción	N	P	K	Ca	Mg	S	Na	Zn	Cu	Mn	Fe	B	Cd
3629	casaca de cacao Choclino BI	1.55	0.77	5.2	0.62	0.42	0.06	0.02	63	18	161	207	66	1.8
3631	casaca de cacao La Soledad BI	1.29	0.29	8.4	0.76	0.7	0.13	0.03	131	34	114	134	136	0.95
3519	pecolo de la Palma Aceitera BI	0.53	0.08	0.64	1.67	0.26	0.08	0.12	20	7	343	141	13	0
3522	hoja de la Palma Aceitera BI	1.29	0.19	0.97	2.2	0.37	0.02	0.07	43	12	1100	356	18	0.15
3525	pecolo de la Palma Aceitera BII	0.34	0.06	0.45	2.18	0.3	0.11	0.1	21	12	435	221	20	0.45
3527	corteza del Palmito BI	1.03	0.48	2.72	0.91	0.37	0.01	0.03	27	17	193	133	14	0.15
3529	raquis del Palmito BI	0.53	0.5	2.7	0.66	0.34	0.02	0.03	32	16	153	114	23	0.15
3533	corteza Palmito BII	0.68	0.38	2.02	0.67	0.3	0.15	0.03	26	14	212	127	25	0.6
3531	raquis del Palmito BII	0.62	0.44	2.33	0.65	0.28	0.02	0.03	32	13	215	126	9	0.1
3543A	corteza del Palmito Apropal BI	1.1	0.43	5.05	0.92	0.38	0.03	0.03	69	28	121	666	22	0.1
3543B	corteza del Palmito Apropal BI	0.84	0.6	0.29	0.41	0.13	0.06	0.04	12	4	77	39	11	0.05
3536A	casaca Sacha Inchi BI	0.86	0.05	0.61	0.52	0.14	0.02	0.02	44	16	46	486	12	0
3536B	casaca Sacha Inchi BI	0.78	0.23	2.88	0.31	0.12	0.14	0.03	26	13	6	154	54	0.13
3537	casaca Sacha Inchi BII	0.78	0.12	0.7	0.72	0.23	0	0.03	67	24	67	813	24	0
3545	casaca Sacha Inchi BII	0.96	0.08	0.74	0.64	0.2	0.05	0.02	69	26	67	1332	24	0.1
3540A	casquilla del Arroz BI	0.47	0.09	0.59	0.18	0.1	0.07	0.02	45	8	338	237	14	0.75
3540B	casquilla del Arroz BI	0.47	0.09	0.59	0.18	0.1	0.07	0.02	45	8	338	237	14	0.75
3541A	casquilla del Arroz BII	0.64	0.13	0.66	0.26	0.12	0.08	0.03	51	10	392	437	13	0.05
3541B	casquilla del Arroz BII	0.64	0.13	0.66	0.26	0.12	0.08	0.03	51	10	392	437	13	0.05

... Continuación.

código	dap T1	dap T2	dap T3	pH T1	pH T2	pH T3	pH T4	pH T5	CE T1	CE T2	CE T3	CE T4	CE T5	MO T1	MO T2
3629	0.235	0.226	0.244	9.97	10.09	10.35	9.53	9.95	12.10	4.77	5.50	6.48	6.60	81.40	82.57
3631	0.227	0.223	0.232	9.84	9.76	10.22	10.15	10.35	15.90	11.70	11.90	13.30	13.90	73.58	74.89
3519	0.293	0.280	0.268	8.58	9.22	9.32	8.31	9.05	0.44	0.42	0.69	0.83	0.79	94.93	95.81
3522	0.307	0.304	0.302	9.46	8.85	8.53	8.25	8.30	0.71	0.23	0.34	0.93	0.64	84.42	84.56
3525	0.304	0.310	0.314	9.33	8.94	8.93	7.82	8.03	0.67	0.70	0.75	1.69	1.23	94.01	95.27
3527	0.295	0.295	0.290	10.08	9.99	10.45	9.70	10.09	1.51	1.34	1.59	1.67	2.14	92.99	93.40
3529	0.274	0.274	0.271	10.24	10.08	10.69	9.88	10.42	1.76	1.71	2.03	1.93	2.51	93.95	94.32
3533	0.274	0.270	0.275	10.08	9.85	10.50	9.61	10.01	1.16	1.13	1.52	1.71	2.00	94.63	95.00
3531	0.280	0.275	0.277	10.45	10.36	10.35	10.04	10.18	1.55	1.31	1.38	1.97	1.69	95.05	95.61
3543A	0.243	0.238	0.244	10.50	10.36	11.10	10.52	10.99	6.03	5.25	5.25	5.53	6.56	87.51	87.82
3543B	0.249	0.243	0.250	10.47	10.40	11.05	10.31	10.77	5.40	3.86	4.69	5.48	5.84	86.63	87.20
3536A	0.601	0.596	0.600	8.67	8.60	9.84	9.06	9.45	0.15	0.13	0.31	0.23	0.49	97.79	98.16
3536B	0.594	0.603	0.607	9.21	9.51	8.80	9.31	9.47	0.28	0.24	0.26	0.47	0.47	97.00	97.33
3537	0.628	0.615	0.619	9.34	9.45	9.25	9.63	9.33	0.29	0.19	0.21	0.34	0.36	97.75	98.10
3545	0.591	0.599	0.602	8.63	8.40	9.38	8.60	9.38	0.15	0.16	0.35	0.27	0.44	97.58	98.02
3540A	0.271	0.266	0.264	7.37	7.39	7.55	7.00	7.18	0.17	0.15	0.17	0.29	0.30	71.59	71.73
3540B	0.280	0.275	0.268	7.60	7.44	7.70	7.14	7.30	0.16	0.13	0.24	0.31	0.37	68.44	68.55
3541A	0.256	0.258	0.260	8.54	8.42	8.82	8.25	8.59	0.38	0.25	0.29	0.46	0.45	65.04	65.26
3541B	0.264	0.256	0.264	8.45	8.80	8.69	8.40	8.57	0.39	0.41	0.43	0.69	0.67	63.18	63.43

...Continuación.

código	CH1	CH2	CH3	MV1	MV2	MV3	CZ1	CZ2	CZ3	CF1	CF2	CF3	COT1	COT2	C/N T1	C/N T2
3629	6.39	6.10	7.25	30.84	31.25	27.95	20.86	20.86	18.95	48.31	47.88	53.10	61.63	60.95	39.8	39.3
3631	6.48	8.13	6.88	34.21	32.16	32.79	20.54	20.98	17.35	45.25	46.86	49.86	58.54	60.75	45.4	47.1
3519	5.37	4.22	5.31	19.19	19.55	16.24	7.25	5.16	8.31	73.56	75.29	75.44	88.91	88.14	167.8	166.3
3522	5.37	4.57	5.28	21.36	21.22	20.85	19.51	19.36	19.34	59.12	59.42	59.81	76.58	76.85	59.4	59.6
3525	4.42	5.12	4.62	22.40	21.30	21.37	5.61	5.63	5.77	71.99	73.07	72.87	89.54	89.20	263.3	262.4
3527	6.50	5.89	6.08	17.21	16.69	15.63	8.34	7.41	8.24	74.45	75.90	76.14	88.11	87.46	85.5	84.9
3529	6.95	5.93	6.63	15.05	13.88	13.29	8.39	6.05	6.23	76.56	80.06	80.48	90.90	90.40	171.5	170.6
3533	6.51	5.71	6.30	16.15	15.74	15.38	6.86	5.80	5.75	76.99	78.46	78.87	89.44	88.59	131.5	130.3
3531	8.28	4.71	9.83	15.79	14.83	9.92	6.55	4.95	6.81	77.66	80.23	83.27	89.46	89.65	144.3	144.6
3543A	9.15	9.56	7.75	14.73	12.73	11.43	15.70	17.38	12.37	69.57	69.89	76.21	84.27	84.08	76.6	76.4
3543B	7.15	8.32	5.55	13.45	12.32	13.74	14.03	13.87	14.82	72.52	73.81	71.44	84.27	84.08	100.3	100.1
3536A	3.52	4.30	3.94	12.33	10.65	12.12	1.72	1.65	1.80	85.94	87.69	86.08	97.68	97.76	113.6	113.7
3536B	3.09	3.24	4.10	11.44	12.69	11.85	2.54	2.39	2.21	86.02	84.92	85.94	97.68	97.76	125.2	125.3
3537	5.34	5.35	4.00	9.36	7.80	7.37	3.69	1.77	1.71	86.96	90.43	90.92	94.20	99.55	120.8	127.6
3545	4.96	5.29	4.81	8.54	7.79	8.57	1.87	3.49	2.20	89.60	88.72	89.23	94.20	99.55	98.1	103.7
3540A	4.40	3.08	4.44	25.04	29.02	27.96	41.05	39.15	30.15	33.91	31.83	41.89	55.25	58.91	117.6	125.3
3540B	2.69	3.21	4.12	23.41	24.11	25.71	42.24	42.17	39.59	34.35	33.72	34.70	55.25	58.91	117.6	125.3
3541A	4.42	5.40	4.70	16.56	12.83	13.76	41.81	41.02	40.54	41.63	46.15	45.70	60.95	58.44	95.2	91.3
3541B	6.00	4.58	5.25	12.25	13.89	12.74	44.15	43.18	42.24	43.60	42.93	45.02	60.95	58.44	95.2	91.3

ANEXO 2: RELACIÓN DE VARIABLES SOBRE EL NIVEL DE PIROLISIS DEL BIOCHAR PARA CADA TIPO DE MATERIA PRIMA.

Materia Prima	Biomasa (kg)	Tamaño^a (cm)	CH^b (%)	CH^c (%)	Nivel^d	Porcentaje	Biochar (kg)
Cacao							
L1 Cáscara	17.1	15 - 20 L	84.0	25.0	T	78.6 %	3.3
					P	14.3 %	
					L	7.1 %	
L2 Cáscara	15.3	10 - 15 L	84.0	28.0	T	57.9 %	4.1
					P	22.1 %	
					L	20 %	
Palma aceitera							
L1 Peciolo	11.5	10 - 20 L/ 1 - 7 A	75.6	33.8	T	38.6 %	2.1
					P	32.5 %	
					L	28.9 %	
L1 Hoja	2.5	10 - 15 L	24.8	11.0	T	72 %	1.2
					L	28 %	
L2 Peciolo	12.2	10 - 15 L/ 1 - 5 A	75.6	57.6	T	65.7 %	4.0
					P	34.3 %	
Palmito							
L1 Corteza externa	12.0	15 L/ 5 A	82.4	64.8	T	57.4 %	2.2
					P	42.6 %	
L1 Raquis	2.5	15 - 20 L	73.4	47.0	T	100 %	0.5
L2 Corteza externa	11.5	10 L/ 5 A	82.4	70.5	T	100 %	2.1
L2 Raquis	1.5	10 - 20 L	73.4	50.6	T	100 %	0.2
Palmito							
L1 Corteza interna	9.5	30 - 40 L	82.4	54.0	T	100 %	2.0
Sacha Inchi							
L1 Cáscara	24.0	Estándar	14.2	12.8	T	100 %	8.9
L1 Cáscara	23.0	Estándar	14.2	12.9	T	100 %	8.5
Arroz							
L1 Cascarilla	8.0	Estándar	12.3	10.8	T	100 %	3.4
L1 Cascarilla	7.8	Estándar	12.3	11.2	T	100 %	3.2

L: Lote de producción.

^a Tamaño de partícula de la materia prima (L: largo; A: ancho).

^b Contenido de Humedad teórico de la materia prima.

^c Contenido de Humedad remanente en la materia prima.

^d Nivel de pirolisis alcanzado en la producción de biochar (T: total; P: parcial; L: ligera).

ANEXO 3: ANÁLISIS DE VARIANZA SEGÚN LA DENSIDAD APARENTE DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE MATERIA PRIMA EMPLEADOS

1. Análisis de Varianza:

```

      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
MP      7 0.58855 0.084078  1448.4 < 2.2e-16 ***
Residuals 37 0.00215 0.000058
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

2. Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

Study:

HSD Test for dap

	dap	std.err	r	Min.	Max.
Arroz	0.2611667	0.0008724168	6	0.259	0.264
Cacao	0.2505000	0.0010567245	6	0.248	0.255
Palma_H	0.3043333	0.0014529663	3	0.302	0.307
Palma_P	0.2958333	0.0061990143	6	0.280	0.314
Pmito_C	0.2831667	0.0046577295	6	0.270	0.295
Pmito_Ca	0.2445000	0.0018027756	6	0.238	0.250
Pmito_R	0.2751667	0.0012494443	6	0.271	0.280
SInchi	0.6031667	0.0020883273	6	0.596	0.609

Mean Square Error: 5.804955e-05
alpha: 0.05 ; Df Error: 37

Critical Value of Studentized Range: 4.540077
Harmonic Mean of Cell Sizes 5.333333
Honestly Significant Difference: 0.01497832

Means with the same letter are not significantly different.

Groups, Treatments and means

a	SInchi	0.6032
b	Palma_H	0.3043
bc	Palma_P	0.2958
cd	Pmito_C	0.2832
de	Pmito_R	0.2752
ef	Arroz	0.2612
fg	Cacao	0.2505
g	Pmito_Ca	0.2445

ANEXO 4: ANÁLISIS DE VARIANCIAS SEGÚN EL PH DE LA METODOLOGÍA 1 DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS

1. Análisis de Variancia (ANVA)

```
> anova(PH1)
Analysis of Variance Table

Response: PH1
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
MP      7 44.449   6.3498  192.33 < 2.2e-16 ***
Residuals 37  1.222   0.0330
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

2. Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

Study:

HSD Test for PH1

Mean Square Error: 0.03301532

MP, means

	PH1	std.err	r	Min.	Max.
Arroz	7.608333	0.04110285	6	7.44	7.70
Cacao	10.200000	0.04531372	6	10.05	10.35
Palma_H	8.756667	0.11392005	3	8.53	8.89
Palma_P	9.108333	0.06263208	6	8.93	9.32
Pmito_C	10.158333	0.10606340	6	9.85	10.50
Pmito_Ca	10.738333	0.11923133	6	10.40	11.10
Pmito_R	10.508333	0.05804692	6	10.35	10.69
SInchi	9.371667	0.04028372	6	9.25	9.51

alpha: 0.05 ; Df Error: 37

Critical Value of Studentized Range: 4.540077

Harmonic Mean of Cell Sizes 5.333333

Honestly Significant Difference: 0.3572083

Means with the same letter are not significantly different.

Groups,	Treatments	and means
a	Pmito_Ca	10.74
ab	Pmito_R	10.51
bc	Cacao	10.2
c	Pmito_C	10.16
d	SInchi	9.372
de	Palma_P	9.108
e	Palma_H	8.757
f	Arroz	7.608

ANEXO 5: ANÁLISIS DE VARIANCIA SEGÚN EL PH DE LA METODOLOGÍA 2 DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS

1. Análisis de Variancia (ANVA)

```

Response: PH2
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
MP      7 32.668   4.6669  67.524 2.112e-13 ***
Residuals 22  1.521   0.0691
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2628969
Estimated effects may be unbalanced
15 observations deleted due to missingness

```

2. Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

Study:

HSD Test for PH2

Mean Square Error: 0.06911477

MP, means

	PH2	std. error	Min.	Max.
Arroz	7.3575	0.05072393	4 7.21	7.44
Cacao	9.9875	0.05452446	4 9.92	10.15
Palma_H	8.2750	0.02500000	2 8.25	8.30
Palma_P	8.4525	0.28090256	4 7.92	9.05
Pmito_C	9.8525	0.11664583	4 9.61	10.09
Pmito_Ca	10.5975	0.11382552	4 10.31	10.79
Pmito_R	10.1300	0.11445523	4 9.88	10.42
SInchi	9.3350	0.04991660	4 9.23	9.47

alpha: 0.05 ; Df Error: 22
 Critical Value of Studentized Range: 4.72167

Harmonic Mean of Cell Sizes 3.555556
 Honestly Significant Difference: 0.6583053

Means with the same letter are not significantly different.

Groups, Treatments and means

a	Pmito_Ca	10.6
ab	Pmito_R	10.13
ab	Cacao	9.988
bc	Pmito_C	9.852
c	SInchi	9.335
d	Palma_P	8.452
d	Palma_H	8.275
e	Arroz	7.358

ANEXO 6: ANÁLISIS DE VARIANCIA SEGÚN LA CE DE LA METODOLOGÍA 1 DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS

1. Análisis de Variancia (ANVA)

Response: CE1

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MP	7	210.966	30.1380	190.55	< 2.2e-16 ***
Residuals	37	5.852	0.1582		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.3976984
Estimated effects may be unbalanced

2. Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

Study:

HSD Test for CE1

Mean Square Error: 0.158164

MP, means

	CE1	std.err	r	Min.	Max.
Arroz	0.2520000	0.006016644	6	0.232	0.268
Cacao	6.1133333	0.355168192	6	4.770	6.900
Palma_H	0.3146667	0.044759853	3	0.229	0.380
Palma_P	0.6806667	0.016804100	6	0.623	0.745
Pmito_C	1.4416667	0.050425963	6	1.260	1.590
Pmito_Ca	4.9616667	0.243192882	6	3.860	5.400
Pmito_R	1.5450000	0.080405224	6	1.310	1.830
SInchi	0.3366667	0.007392188	6	0.308	0.363

alpha: 0.05 ; Df Error: 37
Critical Value of Studentized Range: 4.540077

Harmonic Mean of Cell Sizes 5.333333
Honestly Significant Difference: 0.7818395

Means with the same letter are not significantly different.

Groups, Treatments and means

a	Cacao	6.113
b	Pmito_Ca	4.962
c	Pmito_R	1.545
c	Pmito_C	1.442
d	Palma_P	0.6807
d	SInchi	0.3367
d	Palma_H	0.3147
d	Arroz	0.252

ANEXO 7: ANÁLISIS DE VARIANCIA SEGÚN LA CE DE LA METODOLOGÍA 2 DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS

1. Análisis de Variancia (ANVA)

Response: CE2

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MP	7	158.604	22.658	782.28	< 2.2e-16 ***
Residuals	22	0.637	0.029		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

2. Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

Study:

HSD Test for CE2

Mean Square Error: 0.02896383

MP, means

	CE2	std.err	r	Min.	Max.
Arroz	0.35300	0.007382412	4	0.335	0.369
Cacao	6.45750	0.124390179	4	6.100	6.650
Palma_H	0.63450	0.008500000	2	0.626	0.643
Palma_P	0.93650	0.072853163	4	0.792	1.090
Pmito_C	1.88000	0.113651514	4	1.670	2.140
Pmito_Ca	5.72750	0.136465808	4	5.480	6.060
Pmito_R	1.95000	0.025819889	4	1.890	2.010
SInchi	0.46275	0.006860211	4	0.443	0.473

alpha: 0.05 ; Df Error: 22

Critical Value of Studentized Range: 4.72167

Harmonic Mean of Cell Sizes 3.555556

Honestly Significant Difference: 0.4261573

Means with the same letter are not significantly different.

Groups, Treatments and means

a	Cacao	6.458
b	Pmito_Ca	5.728
c	Pmito_R	1.95
c	Pmito_C	1.88
d	Palma_P	0.9365
de	Palma_H	0.6345
e	SInchi	0.4628
e	Arroz	0.353

ANEXO 8: ANÁLISIS DE VARIANCIA SEGÚN EL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS

1. Análisis de Variancia (ANVA)

Response: MO

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MP	7	298282	42612	386.4	< 2.2e-16 ***
Residuals	22	2426	110		

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

2. Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

Study:

HSD Test for MO

Mean Square Error: 110.2776

MP, means

	MO	std.err	r	Min.	Max.
Arroz	666.7000	0.9336309	4	664.900	669.000
Cacao	801.0935	13.7271668	4	775.800	825.674
Palma_H	844.9050	0.7160000	2	844.189	845.621
Palma_P	949.2955	0.5354315	4	948.100	950.700
Pmito_C	938.2033	2.1869104	4	934.013	942.600
Pmito_Ca	873.1503	1.5544813	4	869.300	876.200
Pmito_R	946.0605	2.1984707	4	941.500	950.482
SIInchi	978.5457	0.6815495	4	977.000	980.183

alpha: 0.05 ; Df Error: 22

Critical Value of Studentized Range: 4.72167

Harmonic Mean of Cell Sizes 3.555556

Honestly Significant Difference: 26.29575

Means with the same letter are not significantly different.

Groups, Treatments and means

a	SIInchi	978.5
b	Palma_P	949.3
b	Pmito_R	946.1
b	Pmito_C	938.2
c	Pmito_Ca	873.2
c	Palma_H	844.9
d	Cacao	801.1
e	Arroz	666.7

ANEXO 09: ANÁLISIS DE VARIANCIA SEGÚN EL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNITO TOTAL DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS

1. Prueba de Bartlett para Homogeneidad de Variancias:

Bartlett's χ^2 = 7.3189, df = 7, p-value = 0.3964

2. Análisis de Variancia (ANVA)

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MP	7	558845	79835	9700.7	< 2.2e-16 ***
Residuals	22	181	8		

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

3. Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

Study:

HSD Test for COT

Mean Square Error: 8.229847

MP, means

	COT	std.err	r	Min.	Max.
Arroz	586.3692	1.7266955	4	582.500	589.500
Cacao	610.1658	2.4053149	4	605.400	616.300
Palma_H	767.1155	1.3575000	2	765.758	768.473
Palma_P	890.9858	0.7509792	4	889.143	892.400
Pmito_C	883.9818	1.0235222	4	881.068	885.859
Pmito_Ca	841.7480	0.5496375	4	840.796	842.700
Pmito_R	901.7700	1.5999687	4	898.500	905.000
SInchi	975.4860	1.2411011	4	972.000	977.612

alpha: 0.05 ; Df Error: 22

Critical value of Studentized Range: 4.72167

Harmonic Mean of Cell Sizes 3.555556

Honestly Significant Difference: 7.183528

Means with the same letter are not significantly different.

Groups, Treatments and means

a	SInchi	975.5
b	Pmito_R	901.8
c	Palma_P	891
d	Pmito_C	884
e	Pmito_Ca	841.7
f	Palma_H	767.1
g	Cacao	610.2
h	Arroz	586.4

ANEXO 10: ANÁLISIS DE VARIANCIA SEGÚN EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS

1. Prueba de Bartlett para Homogeneidad de Variancias:

Bartlett's χ^2 = 17.5602, df = 7, p-value = 0.01412

2. Análisis de Variancia (ANVA)

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MP	7	90.899	12.9855	21.596	2.832e-11 ***
Residuals	37	22.247	0.6013		

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

3. Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

Study:

HSD Test for CH1

Mean Square Error: 0.6012793

MP, means

	CH1	std. err	r	Min.	Max.
Arroz	3.589833	0.2948133	6	2.691	4.438
Cacao	6.606833	0.1403169	6	6.100	7.000
Palma_H	5.074667	0.2536088	3	4.570	5.371
Palma_P	5.009333	0.1972970	6	4.222	5.420
Pmito_C	6.165167	0.1350966	6	5.709	6.514
Pmito_Ca	8.019000	0.4481846	6	7.010	9.561
Pmito_R	7.555000	0.5650930	6	5.932	9.831
SInchi	4.959333	0.2115038	6	4.004	5.354

alpha: 0.05 ; Df Error: 37

Critical Value of Studentized Range: 4.540077

Harmonic Mean of Cell Sizes 5.333333

Honestly Significant Difference: 1.524411

Means with the same letter are not significantly different.

Groups, Treatments and means

a	Pmito_Ca	8.019
ab	Pmito_R	7.555
abc	Cacao	6.607
bcd	Pmito_C	6.165
cde	Palma_H	5.075
de	Palma_P	5.009
de	SInchi	4.959
e	Arroz	3.59

ANEXO 11: ANÁLISIS DE VARIANCIA SEGÚN EL CONTENIDO DE MATERIAL MÓVIL DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS

1. Prueba de Bartlett para Homogeneidad de Variancias:

Bartlett's κ -squared = 16.9711, df = 7, p-value = 0.01758

2. Análisis de Variancia (ANVA)

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MP	7	2279.37	325.62	806.35	< 2.2e-16 ***
Residuals	37	14.94	0.40		

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

3. Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

Study:

HSD Test for MV

Mean Square Error: 0.4038266

MP, means

	MV	std. error	Min.	Max.
Arroz	24.14833	0.2364941	23.410	24.880
Cacao	32.04483	0.4306581	30.840	33.200
Palma_H	21.14433	0.1531626	20.850	21.365
Palma_P	20.70617	0.3238679	19.740	21.572
Pmito_C	16.19267	0.2231074	15.379	16.750
Pmito_Ca	12.48150	0.1044362	12.190	12.850
Pmito_R	14.31950	0.2824325	13.294	15.120
SInchi	8.64300	0.0813810	8.360	8.920

alpha: 0.05 ; Df Error: 37
 Critical Value of Studentized Range: 4.540077

Harmonic Mean of Cell Sizes 5.333333
 Honestly Significant Difference: 1.249284

Means with the same letter are not significantly different.

Groups, Treatments and means

a	Cacao	32.04
b	Arroz	24.15
c	Palma_H	21.14
c	Palma_P	20.71
d	Pmito_C	16.19
e	Pmito_R	14.32
f	Pmito_Ca	12.48
g	SInchi	8.643

ANEXO 12: ANÁLISIS DE VARIANCIAS SEGÚN EL CONTENIDO DE CENIZA DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS

1. Prueba de Bartlett para Homogeneidad de Variancias:

Bartlett's κ -squared = 16.0676, df = 7, p-value = 0.02451

2. Análisis de Variancia (ANVA)

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MP	7	6549.1	935.58	4663.9	< 2.2e-16 ***
Residuals	37	7.4	0.20		

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

3. Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

Study:

HSD Test for CZ

Mean Square Error: 0.2006013

MP, means

	CZ	std.err	r	Min.	Max.
Arroz	40.928333	0.16158417	6	40.150	41.240
Cacao	20.734333	0.07824946	6	20.520	20.980
Palma_H	19.404333	0.05405655	3	19.342	19.512
Palma_P	6.229000	0.28132970	6	5.612	7.253
Pmito_C	7.457667	0.24380616	6	6.860	8.236
Pmito_Ca	15.416667	0.22582688	6	14.870	16.380
Pmito_R	6.486500	0.13330485	6	6.053	6.890
SInchi	1.886333	0.08506220	6	1.690	2.198

alpha: 0.05 ; Df Error: 37

Critical Value of Studentized Range: 4.540077

Harmonic Mean of Cell Sizes 5.333333

Honestly Significant Difference: 0.8805026

Means with the same letter are not significantly different.

Groups, Treatments and means

a	Arroz	40.93
b	Cacao	20.73
c	Palma_H	19.4
d	Pmito_Ca	15.42
e	Pmito_C	7.458
f	Pmito_R	6.486
f	Palma_P	6.229
g	SInchi	1.886

ANEXO 13: ANÁLISIS DE VARIANCIA SEGÚN EL CONTENIDO DE CARBONO FIJO DEL BIOCHAR GENERADO POR EL PAQUETE ESTADÍSTICO R.3.0.2 PARA LOS DIFERENTES TIPOS MATERIA PRIMA EMPLEADOS

1. Prueba de Bartlett para Homogeneidad de Variancias:

Bartlett's κ -squared = 17.2631, df = 7, p-value = 0.01578

2. Análisis de Variancia (ANVA)

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
MP	7	13514.7	1930.66	3689.7	< 2.2e-16 ***
Residuals	37	19.4	0.52		

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

3. Prueba de Tukey para comparación de medias de tratamiento

Study:

HSD Test for CF

Mean Square Error: 0.5232573

MP, means

	CF	std.err	r	Min.	Max.
Arroz	34.92333	0.1600764	6	34.290	35.350
Cacao	47.22083	0.4278632	6	46.036	48.303
Palma_H	59.45133	0.1982493	3	59.123	59.808
Palma_P	73.06467	0.1023783	6	72.816	73.520
Pmito_C	76.34967	0.4244745	6	75.110	77.471
Pmito_Ca	72.10183	0.2534627	6	71.170	72.811
Pmito_R	79.19400	0.3944582	6	78.280	80.477
SInchi	89.47067	0.1352713	6	89.000	89.950

alpha: 0.05 ; Df Error: 37

Critical Value of Studentized Range: 4.540077

Harmonic Mean of Cell Sizes 5.333333

Honestly Significant Difference: 1.422072

Means with the same letter are not significantly different.

Groups, Treatments and means

a	SInchi	89.47
b	Pmito_R	79.19
c	Pmito_C	76.35
d	Palma_P	73.06
d	Pmito_Ca	72.1
e	Palma_H	59.45
f	Cacao	47.22
g	Arroz	34.92