

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**“Evaluación de un carbonizador portátil de bajo costo en la valorización de residuos
biomásicos lignocelulósicos”**

Eileyn Yamileth Pérez Martínez.

CARTAGO, setiembre, 2015


TEC | Tecnológico de Costa Rica
Ingeniería Ambiental

“Evaluación de un carbonizador portátil de bajo costo en la valorización de residuos biomásicos lignocelulósicos”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura


Miembros del tribunal

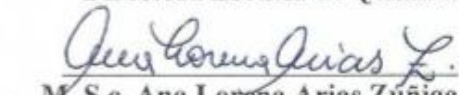

Dr. Jaime Quesada Kimzey
Director


Dr. Roger Moya Roque
Lector 1


Dr. Jesús Mora Molina
Lector 2


Dr. Ing. Luis Romero Esquivel
Coordinador COTRAFIG


Dra. Floria Roa Gutiérrez.
Directora Escuela de Química


M. S.c. Ana Lorena Arias Zúñiga
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

A mis padres quienes siempre confiaron en mí, me apoyaron incondicionalmente y me dieron todo en cuanto pudieron.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme dado fortaleza, paciencia, perseverancia, sabiduría, y salud para alcanzar esta meta, además de permitirme contar con unos padres excepcionales.

A mis padres, Bryan Pérez y Yamileth Martínez, por su amor, apoyo, comprensión, y por la motivación crucial en los momentos más difíciles de la carrera, además de su valioso ejemplo de superación y humildad.

A mis hermanos, Jacqueline, Jeffrey, Estefanie, Steven y a mi sobrino Deykell por su cariño y por hacer los momentos difíciles más tolerables.

A mi abuelita, Odilia Sánchez, por estar siempre pendiente de mí, y tenerme presente en sus oraciones.

A mis amigos y amigas por su amistad, apoyo y fortaleza, y a mis familiares, por su cariño y por tenderme la mano cuando lo necesite.

Al Dr. Jaime Quesada por haber dado la lucha conmigo en este proyecto, por su amistad, paciencia, motivación y todos los conocimientos que me transmitió, y especialmente le agradezco por la gran disposición y capacidad de enseñar que lo caracterizan. También quiero agradecerle por confiar en mí, e impulsarme y apoyarme a lograr metas que fueron todo un reto para mí, pero de las cuales aprendí mucho.

Al profesor e investigador Allen Puente por su amistad, su disposición de ayuda, y su valiosa colaboración en el proyecto, sus consejos para la redacción del documento, y la revisión del mismo .

A Pamela Zúñiga, por su amistad, su apoyo y su valiosa colaboración en la realización de este trabajo.

Al Dr. Dagoberto Arias, al Ing. Gustavo Torres, al MSc. Robert Cubero, al Ing. Francisco Romero, y a los señores Carlos Ovares, Jhonny Gómez, y Didier Tencio por su amable trato, y su colaboración.

Al Dr. Roger Moya por su colaboración en el proyecto y sus recomendaciones en la redacción del documento escrito.

Al Dr. Jesús Mora y al Dr. Luis Romero por sus recomendaciones en la redacción del documento escrito.

A la estudiante de Ing. en Ciencias de los Materiales, Vanessa Valverde, y al estudiante de Ing. en Mantenimiento Industrial, Gabriel Camacho, por su colaboración.

A la Lic. Luz Elena Sáenz Sánchez por su amistad y su colaboración con la revisión del documento.

Al Centro de Investigación en Integración Bosque-Industria (CIIBI), al Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC), y el Vivero Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por proveer sus instalaciones y equipos para el desarrollo de las pruebas.

A la empresa Maderas Bosque Verde por facilitar sus residuos y transportarlos hasta donde se ubicó el carbonizador.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	17
Abstract	19
1 Introducción	21
1.1 <i>Objetivos</i>	22
1.1.1 Objetivo general	22
1.1.2 Objetivos específicos	23
2 Revisión de literatura	25
2.1 <i>Residuos y su gestión integral</i>	25
2.1.1 Residuos	25
2.1.1.1 Residuos de fábricas de tarimas	25
2.1.1.2 Residuos de la construcción	25
2.1.2 Gestión integral de los residuos	26
2.1.2.1 Valorización	27
2.1.2.2 Disposición sanitaria	27
2.2 <i>Biomasa</i>	28
2.2.1 Biomasa lignocelulósica	28
2.2.2 Carbonización pirolítica de la biomasa	28
2.3 <i>Carbón Vegetal</i>	29
2.3.1 Hornos utilizados en procesos de carbonización.	30
2.3.2 Propiedades del carbón	33
2.3.2.1 Propiedades físicas	33
2.3.2.2 Propiedades químicas	34
2.3.3 Usos del carbón vegetal	36
2.3.3.1 Aprovechamiento energético del carbón y su relevancia	36
2.3.3.2 Uso del carbón como mejorador de suelos e importancia.	37
2.3.4 Producción y mercado del carbón en Costa Rica	38
2.3.5 Investigaciones realizadas en el TEC sobre la línea de investigación en pirólisis de biomosas.	39
3 Materiales y métodos	40
3.1 <i>Consecución de residuos biomásicos lignocelulósicos.</i>	40

3.2	<i>Evaluación del carbonizador.</i>	40
3.2.1	Descripción del carbonizador.	40
3.2.2	Procedimiento utilizado para la carbonización de los residuos biomásicos.	43
3.2.3	Metodología empleada para la caracterización y adecuación de los residuos a carbonizar	44
3.2.3.1	Según especies.	44
3.2.3.2	Secado al aire	44
3.2.3.3	Contenido de humedad de la madera	45
3.2.3.4	Poder calórico de la materia prima.	45
3.2.3.5	Reducción de tamaño de los residuos biomásicos.	45
3.2.4	Aspectos evaluados del carbonizador	45
3.2.4.1	Rendimiento de producción del carbón.	45
3.2.4.2	Consumo de leña.	46
3.2.4.3	Estimación de tiempos y procesos	46
3.2.4.4	Generación de humo	46
3.2.4.5	Temperaturas registradas en la carbonización.	46
3.2.4.6	Caracterización del carbón.	46
3.2.4.6.1	Propiedades del carbón.	47
3.2.4.6.2	Pruebas preliminares para conocer el potencial del carbón como enmienda en el suelo.	49
3.2.5	Análisis estadístico	51
3.3	<i>Potencial anual de los residuos</i>	52
3.3.1	Potencial anual del residuo de tarimas de la empresa Maderas Bosque Verde.	52
3.3.2	Potencial anual del residuo de la construcción generado en obras de casas.	54
3.4	<i>Costo monetario de disponer los residuos en el relleno sanitario.</i>	55
4	Resultados y discusión	58
4.1	<i>Evaluación de la carbonización</i>	58
4.1.1	Caracterización de la biomasa	58
4.1.1.1	Según especies y su condición	58
4.1.1.2	Contenido de humedad.	58
4.1.2	Aspectos evaluados al carbonizador	59
4.1.2.1	Rendimiento de producción de carbón	59
4.1.2.2	Consumo de leña	60
4.1.2.3	Tiempos y procesos	61

4.1.2.4	Humo.	62
4.1.2.5	Temperaturas.	63
4.1.2.6	Problemas identificados en la operación del carbonizador y posibles mejoras.	65
4.1.2.7	Caracterización del carbón.	66
4.1.2.7.1	Propiedades físicas	66
4.1.2.7.1.4	<i>Resistencia a la compresión.</i>	69
4.1.2.7.2	Propiedades químicas	70
4.1.2.7.3	Pruebas preliminares para conocer el potencial del carbón como enmienda en el suelo.	74
4.2	<i>Potencial anual de los residuos</i>	78
4.3	<i>Costo monetario de disponer los residuos en el relleno sanitario.</i>	80
4.4	<i>Valorización vs. disposición final de los residuos</i>	82
5	Conclusiones y recomendaciones	84
6	Referencias	86
7	Apéndices	90
7.1	<i>Apéndice 1. Dimensiones del carbonizador.</i>	91
7.2	<i>Apéndice 2: Muestreo del carbón.</i>	92
7.3	<i>Apéndice 3: Resistencia a la Compresión del carbón.</i>	94
7.4	<i>Apéndice 4. Resultados de las pruebas de rechazo con lombrices.</i>	95
7.5	<i>Apéndice 5: Resultados de la prueba de germinación en sustratos de tierra-carbón y sustratos control</i>	98
7.6	<i>Apéndice 6. Resultados de ANOVA de un factor, y de la prueba de Tukey para la comparación de medias de los parámetros analizados a los residuos biomásicos.</i>	101
7.7	<i>Apéndice 7: Resultados de ANOVA de un factor, y de la prueba de Tukey para la comparación de medias de los parámetros analizados del rendimiento y el consumo de leña</i>	103
7.8	<i>Apéndice 8. Resultados de ANOVA de un factor, y de la prueba de Tukey para la comparación de medias de los parámetros analizados al carbon de tarimas y el carbon del residuo de la construcción.</i>	104
7.9	<i>Apéndice 9. Residuos de la empresa Maderas Bosque Verde.</i>	117
7.10	<i>Apéndice 10. Densidad del residuo de la construcción</i>	118
7.11	<i>Apéndice 11. Presupuesto para la construcción del carbonizador</i>	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Jerarquización de los residuos sólidos. Tomado de Ministerio de salud, 2011. .	27
Figura 2.2 a) Compresión paralela. b) Compresión perpendicular. Fuente: (Díaz, 2005) ..	34
Figura 3.1 Residuo de tarimas. Figura 3.2 Residuo de la construcción.	
.....	40
Figura 3.3 Partes del carbonizador	42
Figura 3.4 Partes del carbonizador evaluado.....	43
Figura 3.5 Colocación de la biomasa en el barril.	43
Figura 3.6 Preparación de la mezcla de carbón con almidón b) Aglomerado de carbón del residuo de la construcción con almidón para evaluar el poder calórico.	49
Figura 3.7 a) Siembra de las semillas de rábano b) Germinación de las semillas.....	50
Figura 3.8 a) Colocación del separador y los sustratos. SB: Sustrato con biocarbón. SC: Sustrato control b) Colocación de las lombrices	51
Figura 3.9 Conteo de las lombrices.	51
Figura 4.1 Emisión de humo en el carbonizador en la fase pirolítica	63
Figura 4.2 Temperaturas registradas en el tercer ensayo de carbonización del residuo de la construcción.....	64
Figura 4.3 Temperaturas registradas en dos de las carbonizaciones del residuo de la construcción.....	65
Figura 4.4 a) Carbón del residuo de tarimas. b) Carbón del residuo de la construcción.....	67
Figura 4.5 Porcentajes de germinación de semillas en sustratos con tierra y carbón de tarimas a diferentes concentraciones, y en sustratos de tierra (control).....	74
Figura 4.6 Porcentaje de germinación de semillas de rábano en sustratos con tierra y carbón del residuo de la construcción a diferentes concentraciones, y en sustratos de tierra (Control).	75
Figura 4.7 Promedio de lombrices contabilizadas en los sustratos con carbón del residuo de tarimas, y en los sustratos control.....	76
Figura 4.8 Promedio de lombrices contabilizadas en los sustratos con carbón del residuo de la construcción, y en los sustratos control.	77

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2.1 Etapas del proceso pirolítico.....	29
Cuadro 2.2 Descripción de los métodos de producción de carbón comunes, así como un método mejorado	31
Cuadro 2.3 Parámetros de calidad del carbón de acuerdo a varios autores.....	36
Cuadro 3.1 Metodología empleada para determinar las propiedades físicas del carbón.....	47
Cuadro 3.2 Metodología empleada para determinar las propiedades químicas del carbón .	48
Cuadro 4.1 Contenido de humedad y poder calórico del residuo biomásico de tarimas y del residuo de la construcción	59
Cuadro 4.2 Rendimiento de producción del carbón de tarimas y el residuo de la construcción	60
Cuadro 4.3 Consumo de leña en cada ensayo de carbonización, con respecto a la carga del barril	61
Cuadro 4.4 Tiempos promedios estimados en cada etapa de la carbonización.....	61
Cuadro 4.5 Número de carbonizadores y cantidad de carbón generado en una jornada laboral	62
Cuadro 4.6 Propiedades organolépticas del carbón de tarimas y del carbón del residuo de la construcción.....	66
Cuadro 4.7 Densidad del carbón de tarimas y del residuo de la construcción	68
Cuadro 4.8 Densidad de bulto del carbón de tarimas y del residuo de la construcción	68
Cuadro 4.9 Contenido de humedad del carbón de tarimas y del residuo de la construcción según ensayo de carbonización.....	69
Cuadro 4.10 Compresión del carbón del residuo de tarimas y de residuo de la construcción	70
Cuadro 4.11 Contenido de volátiles del carbón de tarimas y del residuo de la construcción según ensayo de carbonización.....	71
Cuadro 4.12 Contenido de cenizas del carbón del residuo de tarimas y del residuo de la construcción.....	72
Cuadro 4.13 Poder calórico del carbón del residuo de tarimas y del residuo de la construcción.	72
Cuadro 4.14 Carbono fijo de los carbones según ensayo de carbonización.....	73

Cuadro 4.15 Información utilizada para estimar el potencial anual de los residuos.	79
Cuadro 4.16 Potencial anual del residuo de la empresa Maderas Bosque verde y de los residuos de la construcción.....	80
Cuadro 4.17 Tarifas de costo de disposición, transporte de los residuos de tarimas y de los residuos de la construcción a rellenos sanitarios de la empresa WPP	81
Cuadro 4.18 Cantidad de viajes anuales que se deben realizar para transportar los residuos de la empresa Maderas Bosque Verde al año.....	81
Cuadro 4.19 Costo monetario anual de disponer los residuos en el relleno sanitario.	82
Cuadro 4.20 Costos de disposición final anual de los residuos y los ingresos que se pueden obtener al valorizarlos.	83

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ANOVA	Análisis de la Varianza
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFIA	Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos
CIIBI	Centro de Investigación en Integración Bosque-Industria
CRC	Colón costarricense
CC	Contenido de Cenizas
CF	Carbón del residuo de la construcción
CH	Contenido de humedad
CV	Contenido de Volátiles
CT	Carbón de tarimas
DB	Densidad de bulto
DC	Densidad del carbón
GC	Gases Condensables
GNC	Gases No Condensables
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático
PC	Poder Calórico
PCc	Poder calórico del carbón.
PCa	Poder calórico del almidón.
PCca	Poder calórico de la mezcla carbón-almidón.
PYMES	Pequeñas y Medianas Empresas
RAC	Residuos Agrícolas de la cosecha
RS	Relleno sanitario.
SC	Sustrato control
SB	Sustrato con biocarbón
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.

RESUMEN

En Costa Rica aproximadamente un 40% de los residuos biomásicos es desaprovechado. Parte de estos son materiales biomásicos lignocelulósicos, que normalmente carecen de una gestión adecuada y se generan en cantidades significativas, reducen la vida útil de rellenos sanitarios, implican costos de transporte y disposición, y al descomponerse emiten gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono y el metano. Una opción de valorización de residuos lignocelulósicos es la carbonización. Un carbonizador portátil de bajo costo, diseñado y construido en el ITCR en el 2012, de 0,208 m³ de capacidad, fue evaluado aplicándolo a dos residuos lignocelulósicos localmente comunes: el residuo de la producción de tarimas y el residuo maderable de la construcción. Se realizaron 3 ensayos de carbonización por residuo y se determinaron el rendimiento de producción de carbón, el consumo de leña, las temperaturas en el reactor, los tiempos y los procesos, la generación de humo, y la calidad del carbón. Esta última se evaluó considerando propiedades organolépticas, densidades, contenido de humedad, resistencia a la compresión, contenido de volátiles, contenido de cenizas, poder calórico, inhibición de la germinación y rechazo por lombrices. Las pruebas se seleccionaron en vista de los dos principales usos previstos para el carbón: fuente de energía limpia, y enmienda de suelo. Los rendimientos de carbón fueron 32% masa/masa (relativo al sustrato) para el residuo de tarimas, y 29% masa/masa para el de la construcción, los cuales son mejores que los rendimientos esperados para este tipo de carbonizador. La leña necesaria para generar el calor requerido en el proceso fue de 34% masa/masa en promedio (relativo al total). El tiempo promedio por carbonización fue de 5 horas. El requerimiento de leña y el tiempo de proceso pueden ser reducidos combinando 2 o más reactores. El carbón obtenido tuvo buena calidad para combustible. Para enmienda de suelo, los resultados de las pruebas de rechazo por lombrices y de germinación sugieren que no contenía sustancias dañinas. El desempeño del carbonizador fue muy bueno; no obstante, se identificaron oportunidades de mejora tendientes al aprovechamiento del calor residual, a la combustión completa de los gases, al mantenimiento del reactor, y al empacado de la biomasa. El carbonizador demostró ser una herramienta útil para la valorización de residuos biomásicos lignocelulósicos y permite obtener un carbón de calidad. Se estimó el costo de disposición en rellenos sanitarios en 18 millones de colones para tarimas y entre 35 y 40 millones de colones para el de construcción. El valor del carbón obtenible de los residuos de

las dos fuentes se estimó en aproximadamente 146 millones de colones y 218 millones de colones respectivamente.

Palabras Clave: *Valorización, carbonización, pirólisis, residuos biomásicos lignocelulósicos.*

ABSTRACT

Approximately 40% of residual biomass in Costa Rica is wasted. Lignocellulosic wastes are a part; though they are generated in significant quantities in Costa Rica, they often lack proper management. Their disposal in landfills involves transportation and handling costs, implies later emissions of greenhouse gases, and shortens the lifespan of the landfills. One way to valorize these wastes is carbonization. A portable, 55 gallon capacity, low cost carbonizer that is simple to operate, was designed and constructed at the Instituto Tecnológico de Costa Rica in 2012. This carbonizer is evaluated in the present work; to assess its performance, two locally common wastes were used: construction waste and waste from a pallet factory. Three carbonization essays per feedstock were made. Charcoal yield, firewood requirements, temperatures, times and processes, smoke emission, and charcoal quality were assessed. Charcoal quality was assessed by its organoleptic properties, densities, moisture, resistance to compression, volatiles, ash and heat content, germination inhibition and earthworm refusal. These tests were chosen considering the use of the charcoal as an energy vehicle and its use as a soil amendment. Yields were 32% and 29% relative to the processed feedstock mass, respectively, which is better than the expected yields according to the type of kiln. Firewood required for the process was in average 34% relative to the total mass of feedstock. The average processing time was 5 hours. Processing time and firewood requirements can be reduced by combining 2 or more reactors. Charcoal obtained had good quality fuel, according to the most analyzed properties; as a soil amendment, results of the germination test and the earthworm test refusal suggest it did not contain harmful substances. The performance of the carbonizer was very good, however, improvement options were pinpointed, regarding use of wasted heat, completion of gas combustion, maintenance of the kiln and loading of the biomass. The carbonizer showed to be a useful tool for the valorization of lignocellulosic wastes and it produces a good quality charcoal. The eventual annual cost of disposition of the wastes in a landfill was estimated in approximately US \$36 thousand for the pallet waste and US \$75 thousand for the construction waste. The value of the charcoal that could be produced annually from the wastes considered was estimated in approximately US

\$450 thousand for the pallet waste and approximately US \$650 thousand for the construction waste.

Key words: *Valorization, carbonization, pyrolysis, lignocellulosic waste.*

1 INTRODUCCIÓN

En Costa Rica uno de los mayores problemas ambientales que se presentan es la inadecuada e ineficiente gestión de los residuos (Ministerio de salud, 2011). De acuerdo a Soto (2006) en el duodécimo Estado de la Nación, de un 49 % a un 63 % de los residuos sólidos municipales generados, corresponden a material biodegradable.

Según Carazo et al. (2007), aproximadamente un 40,3 % de los residuos biomásicos generados en el país no son aprovechados. Los residuos biomásicos se podrían utilizar para la generación de energías renovables, y con estas sustituir o reducir el uso de las fuentes convencionales de energía (Carazo et al., 2007) y así evitar las emisiones de gases de efecto invernadero (Brownsort, 2009).

Entre los residuos biomásicos están los lignocelulósicos (López, 213). Estos residuos al descomponerse en rellenos sanitarios emiten gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) (potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el dióxido de carbono), y óxidos nitrosos (NO_x) (potencial de calentamiento global es 310 veces mayor que el dióxido de carbono) [(IPCC, por sus siglas en inglés), 2007] (Brownsort, 2009). Al mezclar estos residuos con metales pesados y otros residuos peligrosos, se generan lixiviados de elevada peligrosidad (Soto, 2006). Según el mismo autor, además conllevan costos de transporte, recolección y disposición, y el uso de combustibles fósiles para su transporte, por lo que se generan emisiones.

Disponerlos en rellenos también tiene implicaciones a nivel de espacio, ya que ocupan un gran volumen, causando la disminución de la vida útil del relleno sanitario (Programa de Competitividad y Ambiente (CYMA), 2007) Este es un aspecto relevante debida a la situación crítica de estos sistemas en el país, donde de acuerdo al mismo autor, la mayoría tienen orden sanitarias y otros alcanzan su vida útil antes del 2017.

Cuando son depositados en parajes o botaderos, generan un impacto visual y pueden causar la obstrucción de ríos, terrenos, vías públicas, además de elevados costos de mantenimiento y restauración ambiental, así como afectaciones a la salud (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales (UICN), 2011).

Empresas que fabrican productos de madera y el sector construcción, son de las principales fuentes generadoras de estos residuos.

De acuerdo con Moya & Serrano (2011) en la producción de tarimas se aprovecha solo el 40% de la materia prima, por lo que el resto corresponde a residuos. La mayoría de estas fábricas utilizan la madera verde, por lo que se dificulta su aprovechamiento como combustible.

Según la UICN (2011), del (20 al 30) % de los residuos generados en las construcciones corresponden a madera y a otros materiales afines, y se estimó de acuerdo al CYMA (2007), que en el país se generan 660 toneladas por día de residuos de madera de la construcción.

Una opción para la valorización de los residuos lignocelulósicos, es su carbonización. Emplear el carbón como mejorador de suelos reduciendo con ello la necesidad de fertilizantes nitrogenados y otros insumos agrícolas, reduce la generación de emisiones de óxidos nitrosos (United States Department of Agriculture, 2009). Además permite que el carbono sea fijado en el suelo (aproximadamente un 50% del carbono de la biomasa queda retenido en el carbón), con lo que se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero (Lehmann et al., 2006) o bien si se utiliza para quemar no agrega más carbono al ciclo, como sí ocurre al quemar carbón mineral y otros combustibles fósiles.

En este trabajo se evaluó un carbonizador portátil de bajo costo que fue diseñado y construido en el ITCR en el 2012, parte del propósito del carbonizador es minimizar las emisiones de humo. Para evaluarlo se utilizó para carbonizar 2 residuos lignocelulósicos, provenientes de las principales fuentes generadoras de este residuo en el país. En la evaluación se consideraron aspectos como el rendimiento de producción de carbón, el consumo de leña, los tiempos y procesos, la calidad del producto obtenido y la emisión de humo. El humo es de interés por ser un contaminante atmosférico típicamente emitido en grandes cantidades en los procesos convencionales de carbonización.

Complementariamente, se estimaron el costo económico que conllevaría la disposición de estos residuos en el relleno sanitario, así como el valor del carbón obtenible de ellos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Evaluar el carbonizador portátil de bajo costo en la valorización de residuos lignocelulósicos generados en cantidades significativas.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Disponer de 2 residuos biomásicos lignocelulósicos generados en cantidades significativas.
2. Evaluar la carbonización de los residuos por los métodos definidos.
3. Estimar el potencial anual de los residuos, en cada caso.
4. Estimar el costo monetario de transportar y disponer en el relleno sanitario, los residuos en estudio.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 RESIDUOS Y SU GESTIÓN INTEGRAL

2.1.1 Residuos

El Ministerio de Salud (2010), en la ley de Gestión Integral de los residuos N° 8839 define residuo como el material sólido, semisólido, líquido o gas, cuyo generador requiere deshacerse de él, proceso que puede o debe realizarse de acuerdo a la jerarquización de los residuos (Figura 2.1).

Igualmente el término residuo, hace referencia a que lo comúnmente llamado “basura” o “desecho”, cuenta con un valor intrínseco: comercial, como subproducto, o en algún proceso, el cual no se puede desaprovechar disponiéndolo en un relleno sanitario o en cualquier paraje. (Ministerio de salud, 2011; Saval, 2012)

2.1.1.1 Residuos de fábricas de tarimas

De acuerdo a Moya & Serrano (2011), la industria secundaria de la madera en nuestro país está compuesta principalmente por las fábricas de tarimas, y por las mueblerías. Según los mismos autores, en el Ministerio de Agricultura y Ganadería se tienen registradas 102 fábricas de tarimas.

En las fábricas de tarimas se estima que solo se utiliza el 40 % de la materia prima, por lo que se genera una cantidad importante de residuos, y la mayoría de estas fábricas utilizan la madera en estado verde lo que dificulta su aprovechamiento como combustible, por tal razón es fundamental encontrar una forma de aprovechar estos residuos (Moya & Serrano, 2011).

2.1.1.2 Residuos de la construcción

El sector de la construcción tiene un papel muy importante en la economía del país. Sin embargo, esta actividad genera impactos negativos a nivel ambiental, al requerir un gran consumo de recursos naturales y generar volúmenes grandes de residuos (CYMA, 2007).

Según el mismo autor, se estima que los metros cuadrados de construcción en el país han seguido el mismo patrón de crecimiento, y por ende ha incrementado la generación de residuos.

De acuerdo al CYMA (2007), los residuos de la construcción corresponden a todos los residuos generados en esta actividad, incluyendo la madera y los escombros.

Según una investigación realizada en el ITCR, se generan por día 660 toneladas de madera, y la UICN estimó que del 20 % al 30% de los residuos generados en la construcción corresponden a madera (CYMA, 2007).

Los residuos de la construcción normalmente no son separados en la fuente, o su separación es inadecuada, por lo que al mezclar los residuos se generan mayores cantidades de residuos peligrosos (UICN, 2011).

Según el mismo autor, en ocasiones son dispuestos en lotes vacíos o cerca de las carreteras. Cuando son transportados a rellenos sanitarios implican emisiones al transportarlos, la afectación de la vida útil del relleno y el aumento de la cantidad de lixiviados peligrosos (Soto, 2006).

2.1.2 Gestión integral de los residuos

La gestión integral de los residuos consiste en poner en práctica acciones regulatorias, operativas, financieras, administrativas, educativas, de planificación, monitoreo y evaluación para el adecuado manejo de los residuos, considerando los procesos desde su generación hasta la disposición final (República de Costa Rica, 2010).

Para una adecuada gestión integral de los residuos se deben tomar en cuenta aspectos como evitar, reducir, reutilizar, valorizar y tratar, antes de darles una disposición sanitaria (Figura 2.1), según Tchobanoglous et al. (1994), donde lo deseable es no generarlos.



Figura 2.1 Jerarquización de los residuos sólidos. Tomado de Ministerio de salud, 2011.

2.1.2.1 Valorización

La valorización se cita como la transformación química, física o biológica de los residuos, la cual normalmente da lugar a una mayor sostenibilidad de los rellenos sanitarios o vertederos (Ministerio de salud, 2011).

Según el mismo autor, existen dos técnicas de valorización, una consiste en la recuperación de los materiales, usándolos como una nueva materia prima, y la otra se basa en el aprovechamiento energético de los residuos.

Con la valorización, además de recuperar el valor material, económico o energético del residuo, también se evita o disminuye el impacto ambiental que estos pueden causar debido a su manejo inadecuado (Ministerio de salud, 2011).

2.1.2.2 Disposición sanitaria

La disposición sanitaria consiste en depositar los desechos en un relleno sanitario de forma controlada y ambientalmente adecuada (República de Costa Rica, 1997).

Y según el mismo autor, los **rellenos sanitarios** son una técnica utilizada para el manejo de los residuos, donde se depositan los residuos, se acomodan, se compactan y se cubren mediante maquinaria; con el fin de prevenir y evitar riesgos a la salud y al ambiente.

2.2 BIOMASA

La biomasa se define como la materia orgánica (vegetal o animal), la cual ha almacenado energía solar mediante el proceso de fotosíntesis (Blanco et al. 1993), donde se incluyen los gases y líquidos desprendidos de la materia orgánica biodegradable (Basu, 2010). La biomasa está compuesta principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno (Kasparbauer, 2009).

Los recursos biomásicos incluyen madera y sus residuos, cultivos agrícolas y sus residuos, residuos sólidos municipales, residuos de animales, residuos del procesamiento de comida, así como plantas acuáticas y algas (Demirbaş, 2001).

2.2.1 Biomasa lignocelulósica

La biomasa lignocelulósica corresponde a las especies vegetales, y está compuesta por componentes estructurales primarios y componentes secundarios (López, 2013). El mismo autor establece que los componentes estructurales primarios, son tres polímeros naturales: celulosa, lignina y hemicelulosa, y los componentes secundarios están compuestos por dos tipos, los extractivos y las cenizas. Los extractivos incluyen partes minoritarias de biomasa que son particulares del tipo de planta, entre los que se pueden incluir aceites, gomas, ceras, pectina, y proteínas (López, 2013), y el segundo tipo, las cenizas, corresponden a los minerales y los compuestos no combustibles de la biomasa, como sodio, potasio, hierro, fósforo y calcio (Basu, 2010).

2.2.2 Carbonización pirolítica de la biomasa

Una forma de valorizar la biomasa lignocelulósica es mediante el proceso termoquímico, denominado carbonización. Consiste en el calentamiento de la materia orgánica en ausencia de oxígeno, en el cual la materia es transformada en un sólido rico en carbono (carbón vegetal o biocarbón) y en materia volátil (gases y líquidos), como agua (H_2O) metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), entre otros (Demirbas & Arin, 2002).

Las etapas que se presentan en la carbonización pirolítica se pueden dividir en cuatro según Basu (2010). En el siguiente cuadro se describe cada etapa, y se presentan los rangos de temperatura a las que se dan.

Cuadro 2.1 Etapas del proceso pirolítico

Etapas	Descripción
I (T<100°C)	Corresponde a la etapa de secado. La biomasa se calienta a bajas temperaturas y se libera la humedad superficial, así como moléculas de agua débilmente unidas
II [T (100°C a 300°C)]	La segunda etapa o etapa intermedia. En esta etapa ocurre la deshidratación exotérmica de la biomasa con la liberación de agua y de gases de bajo peso molecular como CO y CO ₂ (Basu, 2013), además de la destilación de aceites esenciales (Hernández, 2011).
III [T (200°C a 600°C)]	Se presenta la descomposición de moléculas largas de biomasa en carbón, gases condensables (GC) y gases no condensables (GNC).
IV [T (300°C a 900 °C)]	Se da el craqueo de volátiles a carbón y a gases no condensables (Basu, 2010)

En la carbonización pirolítica, el material suele llegar a temperaturas de entre 350°C y 600°C. Para una pirólisis eficiente, es recomendable que el contenido de humedad de la biomasa, sea menor al 30 % (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), 1983).

2.3 CARBÓN VEGETAL

El carbón vegetal es un sólido, poroso, frágil, de color negro, que se puede obtener a través de la carbonización pirolítica (Madrid, 2009), el cual tiene una amplia variedad de usos. Para su producción existen una variedad de técnicas empleadas para la producción de carbón, las

cuales se basan en el principio de aislar la madera del exterior para evitar su contacto con el oxígeno, y evitar que se incendie (FAO, 1983).

2.3.1 Hornos utilizados en procesos de carbonización.

Seguidamente se muestra un cuadro que contiene la descripción de los principales métodos utilizados para la producción de carbón: fosas de tierra, parvas, hornos de ladrillo, hornos metálicos transportables, así como un método mejorado. También se presentan los rendimientos, ventajas y desventajas de cada método.

Cuadro 2.2 Descripción de los métodos de producción de carbón comunes, así como un método mejorado

Método	Descripción	Rendimientos	Ventajas	Desventajas
Fosas de tierra	Consiste en una excavación de terreno, en la cual se coloca la biomasa y se cubre con tierra y vegetación (BUN-CA, 2002)	Rendimientos muy bajos además de carbón de mala calidad (Pacheco & Carmona, 2005)	Es de bajo costo (FAO, 1983).	Se genera un carbón irregular, con mayor contenido de volátiles y contenido de cenizas, y con mayor probabilidad de formación de trozos de carbón mal carbonizados (Pacheco & Carmona, 2005). El carbón se contamina con tierra. Se da la pérdida de calor por radiación (Adam, 2009). Y según el mismo autor, se pueden presentar incendios impredecibles.
Parvas o hornos de tierra	Consiste en apilar la madera sobre el suelo, y cubrirla con tierra (FAO, 1983).	Rendimientos de 16 % a 25 %, siendo el más bajo el más frecuente (FAO, 1983).	Es de bajo costo y es más eficiente que las fosas de tierra (FAO, 1983)	Presenta rendimientos inciertos, y existe una alta probabilidad que se dé la contaminación del carbón con piedras y tierra (Pacheco & Carmona, 2005)
Hornos de ladrillo	Consiste en un horno, al cual se le controla la entrada del aire, y durante la fase del enfriamiento, se sella el horno rápida y herméticamente para impedir el ingreso del aire, y es de construcción sencilla (FAO, 1983).	Rendimientos sorprendentemente buenos de carbón vegetal (27 %), de calidad apta para todos sus usos industriales y domésticos (FAO,1983)	Son más eficientes que las fosas u hornos de tierra. Requieren poca mano de obra.	No se adaptan a la recuperación o quema reciclada de ningún subproducto, alquitrán o gases, con lo que aumenta la contaminación del aire y reduce levemente la posible eficiencia termal (FAO, 1983).

Continuación del Cuadro 2.1 Descripción de los métodos de producción de carbón comunes, así como un método mejorado

Método	Descripción	Rendimientos	Ventajas	Desventajas
Hornos metálicos transportables	Cualquier dispositivo cilíndrico, que contenga entradas y salidas de aire, y que sus partes se pueden separar para que sea transportable (Pacheco & Carmona, 2005).	26 % (FAO, 1983).	<p>Al igual que el método de hornos de ladrillo este método es más eficiente que los métodos tradicionales.</p> <p>Con su uso se acorta la distancia de transporte de la madera (Pacheco & Carmona, 2005).</p> <p>Según la FAO (1983), es fácil de transportar, se obtienen mejores rendimientos con respecto a la masa, ya que se puede controlar mejor la entrada de aire y realizar el proceso en menor tiempo, y el carbón no se contamina con tierra.</p> <p>De acuerdo al mismo autor se pueden carbonizar diversos tipos de materiales, su operación es sencilla, y el proceso requiere menos supervisión que con los métodos anteriores.</p> <p>Es de bajo costo y su construcción es menos compleja que la de los hornos de ladrillo (Pacheco & Carmona, 2005).</p> <p>Puede ser desarmados con facilidad y frecuencia y transportados al lugar donde se encuentra la biomasa (Pacheco & Carmona, 2005).</p>	La materia prima debe ser empaquetada con cuidado para lograr una eficiencia máxima, y los tamaños del material se deben reducir (FAO, 1983).
Sistema mejorado de producción de carbón (SMP)	Unidades piloto de bajo costo, desarrolladas en la India y África, tipo hornos metálicos, para generar un proceso de carbonización más sostenible y amigable con el ambiente (Adam, 2009).	(30 a 40) %	<p>De acuerdo a Adam, J. (2009), los gases volátiles son aprovechados en el secado de la materia prima.</p> <p>El mismo autor menciona que se reducen las emisiones atmosféricas en cerca de 75 %, ya que presenta una fase en la que se queman los gases volátiles, los cuales son aprovechados para acelerar el proceso de carbonización</p> <p>El ciclo de carbonización es de aproximadamente de 12 horas (Adam, 2009).</p>	<p>Se debe mejorar la vida útil del sistema (Adam, 2009).</p> <p>No es transportable.</p>

2.3.2 Propiedades del carbón

2.3.2.1 *Propiedades físicas*

Algunas propiedades organolépticas se consideran indicadores de buena calidad del carbón: color negro azabache, lustroso, sonoro, inodoro (Antal & Grønli, 2003).

Densidad, para carbones de madera, es común que se denomine densidad “real” a aquella que excluye del volumen el correspondiente a los poros, mientras se denomina densidad “aparente” a la que lo incluye.

Byrne & Nagle (1997) encontraron que la densidad “real” del carbón monolítico (sin grietas) es proporcional a la densidad del material utilizado para carbonizar. El carbón se preparó en una atmósfera de nitrógeno a 15°C/h hasta 900°C (Byrne & Nagle, 1997). Las densidades de los carbones analizados por Byrne & Nagle (1997), variaron de 0,07 g/cm³ a 0,6 g/cm³ para el carbón de balsa y el carbón de roble respectivamente, mientras que las maderas fluctuaron de 0,08 g/cm³ (balsa) a 0,7 g/cm³ (roble).

La resistencia a la compresión, de acuerdo a Díaz (2005), se define como toda fuerza externa que es aplicada a un cuerpo, donde las fuerzas resisten a las cargas, las cuales se denominan tensiones internas. Según el mismo autor la tensión interna referida a una unidad de área resistente en una sección transversal de un cuerpo se define como esfuerzo unitario.

Existen dos tipos de fuerzas de compresión para la madera: compresión paralela y la compresión perpendicular a la fibra. La compresión paralela se define como la resistencia que opone una viga a una carga aplicada en el mismo sentido de la dirección de la fibra. (Figura 2.2). La compresión perpendicular corresponde a la resistencia que opone el cuerpo a una carga aplicada en dirección perpendicular a la fibra (Figura 2.2) (Díaz, 2005).

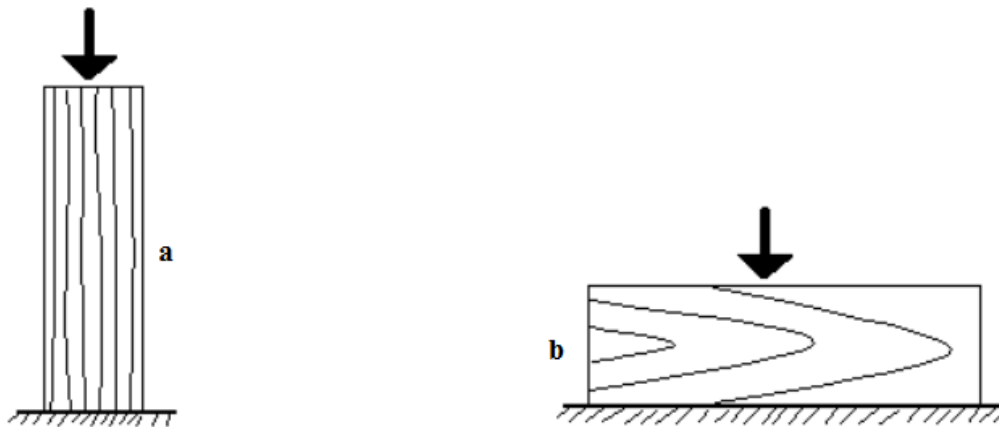


Figura 2.2 a) Compresión paralela. b) Compresión perpendicular. Fuente: (Díaz, 2005)

De acuerdo a Nutsch (2000) la compresión en el sentido perpendicular a la fibra de la madera es de 5 a 8 veces más resistente que en el sentido paralelo a las fibras. En el carbón se presenta un comportamiento similar.

El contenido de humedad es la relación porcentual del peso del agua contenido en la madera, respecto a su peso seco (Córdoba, 2005). Según la FAO (1983), este componente es un adulterante que baja el valor calorífico o de calefacción del carbón vegetal. Además, un carbón con elevado contenido de humedad (10 % o más) tiende a desmenuzarse y produce carbonilla fina cuando se calienta en las fundiciones (FAO, 1983).

2.3.2.2 *Propiedades químicas*

El contenido de volátiles del carbón está compuesto principalmente por hidrocarburos y nitrógeno en menor cantidad, que no fueron eliminados completamente durante el proceso de carbonización (Pacheco & Carmona, 2005).

De acuerdo con Antal & Gronli (2003), la calidad del carbón vegetal con respecto al contenido de volátiles, depende del uso que se le vaya a dar.

El carbón con mucha sustancia volátil es menos quebradizo que el carbón común con poco volátil, por lo que produce menos carbonilla fina durante el transporte y su manipulación, también es más higroscópico y tiene por lo tanto un mayor contenido de humedad natural, y

es mucho más fácil de encender, pero la combustión es menos limpia (FAO, 1983). El mismo autor acota que con temperaturas de carbonización que fluctúan entre 500 °C y 600 °C, los volátiles son escasos y son típicos los rendimientos del 30 %.

Las cenizas son sustancias minerales, como la arcilla, sílice y óxidos de calcio y de magnesio, entre otros, presentes en la madera original y recogida, como contaminaciones del suelo, durante el proceso (FAO, 1983). El contenido de cenizas depende de la especie de madera, la cantidad de corteza incluida con la madera en el horno y la cantidad de contaminación con tierra y arena (Antal & Grønli, 2003).

El contenido de carbono se estima normalmente como una diferencia, o sea, todos los otros componentes (contenido de humedad, contenido de volátiles y contenido de cenizas) se deducen de cien como porcentajes y se supone que lo que queda es el porcentaje de carbono fijo (FAO, 1983).

El poder calórico es definido como la cantidad de calor liberado cuando una unidad de cantidad (masa o volumen) es quemada en una atmósfera de aire u oxígeno (Gadag & Nityananda., 2006). Esta información determina la energía disponible en la biomasa, la cual depende del contenido de humedad (FAO, 1983).

En el siguiente cuadro se muestran los rangos que puede presentar un carbón considerado de buena calidad.

Cuadro 2.3 Parámetros de calidad del carbón de acuerdo a varios autores

Parámetro	Antal & Grønli (2003).	FAO (1983).	Norma EN 1860-2 (Pacheco & Carmona, 2005)	(Byrne & Nagle, 1997)
Densidad del carbón ($\frac{g}{cm^3}$)	-	-	-	0,07-0,6
Contenido de humedad (%)	-	5-15	8	-
Contenido de volátiles (%)	20-30 (Uso doméstico) 10-15 o menos (Metalurgia)	≤ 30	30	-
Contenido de cenizas (%)	0,5-5	0,5-5	8	-
Poder calórico ($\frac{MJ}{kg}$)	28 - 33	28 - 33	-	-
Carbono fijo (%)	-	50-95	50-95	-

Nota: El símbolo – indica que no se registró un valor para dicho parámetro.

2.3.3 Usos del carbón vegetal

Los usos del carbón vegetal se destacan principalmente en la agricultura, en los hogares, y en el área industrial, en este último sector se han identificado amplios mercados, los cuales se cree que se pueden expandir debido a sus múltiples usos (Antal & Grønli, 2003). Entre los usos del carbón están: la industria del silicio, del sulfuro de carbono, de los explosivos, de la cristalería, de los pegamentos, de la metalurgia, de los productos farmacéuticos, de los pigmentos, de la industria del plástico, del caucho, de la corrección de suelos. También es un excelente adsorbente universal, tiene algunas propiedades catalíticas, y es utilizado ampliamente para purificar agua y corrientes de aguas residuales con contenidos orgánicos, cloro y algunos contaminantes inorgánicos (Hernández, 2011).

Entre los usos mencionados se destacan su uso como fuente de energía limpia y su aplicación en los suelos como enmienda, que recientemente han tomado mucho auge

2.3.3.1 Aprovechamiento energético del carbón y su relevancia

Por razones como la dependencia energética mundial de los combustibles fósiles que para el año 2006 se estimó entre el 85 % y el 90 %, sus precios inciertos, su posible agotamiento, y

el incremento de la conciencia ambiental, debido al deterioro del ambiente y los efectos climáticos, es que la bioenergía (energía obtenida de biomasa) ha tenido mayor auge en los últimos años (Kleynhans y von Doderer, 2014). Según los mismos autores, al pertenecer la bioenergía a las energías renovables, producirla y aprovecharla eficientemente puede generar impactos ambientales adversos menores que las energías fósiles.

El carbón vegetal es considerado una fuente de energía limpia, ya que no contribuye al cambio climático, porque el dióxido de carbono emitido en su aprovechamiento es el mismo que la materia vegetal requirió para desarrollarse. En su aprovechamiento se generan varias emisiones de óxidos de azufre y de nitrógeno y otros contaminantes, las cuales de acuerdo a Gómez (2008) y Hernández (2011), son mínimas comparadas con las de las fuentes fósiles. Además es relevante ya que la generación de energía a partir de biomasa contribuye con la diversificación de la matriz energética, y puede implicar la reducción de precios (Hernández, 2011).

En comparación con la leña se destaca que el carbón vegetal contiene un mayor poder calórico, debido a que contiene un mayor porcentaje de carbono fijo, además que genera menores emisiones al quemarlo que la leña, y es más fácil de almacenar (FAO, 1983). Otras ventajas son que es difícilmente alterado por las condiciones atmosféricas normales y no es atacado por agentes biológicos, hongos, y agentes xilófagos que atacan la madera (Sanabria, Cayré, & Frank, 2007).

2.3.3.2 Uso del carbón como mejorador de suelos e importancia.

El carbón manufacturado a través de la pirólisis de la biomasa se denomina biocarbón. El biocarbón genera muchos beneficios ambientales y agronómicos al aplicarlo en el suelo (Laird et al., 2009). Se ha demostrado que el uso del carbón vegetal como enmienda en el suelo, no altera las concentraciones de los parámetros físicoquímicos, tanto del suelo, como de las plantas, y por el contrario mejora su calidad y el crecimiento de las plantas. Además se ha observado la reducción de la emisión del suelo de gases de efecto invernadero (van Zwieten et al., 2010), también puede incrementar el rendimiento de los cultivos,

especialmente por sus mecanismos como la retención de la humedad y la retención de nutrientes en el suelo, mejoras en la estructura del suelo, e incremento de la actividad microbiana, particularmente cuando se aplica en suelos pobres o degradados (Brownsort, 2009b).

Existen evidencias que han permitido atribuirle estos beneficios y han generado un creciente interés en su uso. Entre las principales evidencias se menciona que se descubrió que el biocarbón es el causante de las altas cantidades de carbono orgánico y la fertilidad de las Tierras Negras o bien Terra Preta del Amazonas, y la otra evidencia corresponde a que el carbón es más estable que la materia orgánica por los abonos orgánicos e incrementa la disponibilidad de los nutrientes más que los fertilizantes (Lehmann & Joseph, 2009).

El uso de fertilizantes nitrogenados genera emisiones significativas de óxido nitroso (United States Department of Agriculture, 2009), un gas de efecto invernadero, el cual según el IPCC (2007) presenta un potencial de calentamiento global 310 veces mayor que el dióxido de carbono, a un horizonte de 100 años. Es posible reducir la aplicación de fertilizantes nitrogenados, mediante la aplicación de biocarbón, y con ello reducir las emisiones de óxido nitroso debidas a fertilizantes. A esto habría que sumar la reducción de emisiones debidas a la producción y al transporte de fertilizantes y otros insumos agrícolas, y finalmente el secuestro de carbono en el suelo (Lehmann et al., 2006), sacándolo del ciclo.

2.3.4 Producción y mercado del carbón en Costa Rica

De acuerdo a Carazo et al. (2007), la oferta del carbón vegetal en el país en el año 2006, según los distribuidores, fue de 115 t, donde entre el 40 % al 45 % de carbón fue importado, por lo tanto, la producción nacional de carbón vegetal en ese año fue de aproximadamente 65 t.

El uso principal que se le da al carbón en Costa Rica es para cocción, en el sector residencial, y la principal fuente de materia prima utilizada para la generación de carbón vegetal es madera del suelo (árboles que caen de manera natural en las montañas), y otras fuentes son los residuos de los aserraderos y de la producción de tarimas (Carazo et al., 2007).

2.3.5 Investigaciones realizadas en el TEC sobre la línea de investigación en pirólisis de biomásas.

En el periodo 2008-2010, se inició la investigación sobre la pirólisis de residuos en el TEC, mediante un proyecto denominado “Evaluación de la pirólisis de algunos residuos agroindustriales problemáticos y en plásticos”, desarrollado por la Dra. Floria Roa, y el Dr. Jaime Quesada. Se desarrollaron 2 pirolizadores, 1 de tipo de caída libre, y el otro donde su fuente de calor es un baño de sal fundida, con los cuales se procesaron biomásas, provenientes del sector agroindustrial, como residuos agrícolas de la cosecha de caña (RAC) y RAC de piña, y policarbonato, para generar aceites de pirólisis u otras sustancias químicas de valor agregado, y por ende brindarles un mejor manejo a estos residuos. De dicho proyecto quedó abierta la línea de trabajo en carbonización de residuos para obtener energía o bien para otros usos, como el mejoramiento de suelos, las cuales son aplicaciones relevantes tanto a nivel ambiental, social y económico (Roa & Quesada, 2011).

En los siguientes años y hasta la actualidad, el profesor e investigador Quesada ha continuado con la investigación en este área. En el 2012, inició con dos proyectos relacionados con la carbonización de la biomasa del beneficiado del café en cooperación con Coopetarrazú. Uno se basó en el aprovechamiento de las biomásas en seco, y el otro, que se encuentra actualmente en desarrollo, se enfoca en la carbonización hidrotérmica de biomasa presente en las aguamieles. Asimismo el Dr. Quesada desarrolló, con la ayuda de otros académicos, el carbonizador portátil de bajo costo para la valorización de biomasa que es evaluado en el presente trabajo, el cual se describe en la metodología.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describen los dos residuos biomásicos empleados para carbonizarlos, y la metodología utilizada para evaluar el carbonizador. Además se muestra el procedimiento utilizado para determinar el potencial anual que se puede obtener del carbón y el procedimiento realizado para estimar el costo monetario de disponer los residuos en el relleno sanitario.

3.1 CONSECUCIÓN DE RESIDUOS BIOMÁSICOS LIGNOCELULÓSICOS.

Se dispuso de los residuos de tarimas de la empresa Maderas Bosque Verde ubicada en Agua Caliente de Cartago, y los residuos maderables de obras constructivas desarrolladas en el ITCR. Los residuos fueron transportados al área del CIIBI, donde se ubicaba el carbonizador. Seguidamente se muestra unas fotografías de los residuos biomásicos que se carbonizaron.



Figura 3.1 Residuo de tarimas.



Figura 3.2 Residuo de la construcción.

3.2 EVALUACIÓN DEL CARBONIZADOR.

3.2.1 Descripción del carbonizador.

El carbonizador evaluado cuenta con cuatro partes principales que son removibles: la tapa, el barril modificado, la campana y la chimenea [Figura 3.3 (a, b, g, h)]

El barril modificado [Figura 3.3 (b)] tiene la función de cámara de carbonización, posee una capacidad de 0,208 m³ (55 galones) y una vez cargado se le coloca una tapa de acero que

permite sellarlo para que el proceso se dé en ausencia de aire [Figura 3.3 (a)], y se forme el carbón. El barril tiene adaptado tres tubos de hierro a manera de patas, unido cada uno por codos al barril [Figura 3.3 (d, e, f)], que conducen los gases pirolíticos al mismo sitio donde se genera calor inicialmente mediante combustión de leña [Figura 3.3 (f)].

La campana removible es hueca [Figura 3.3 (h)], y cubre el barril. Su función es ser la cámara de combustión. Cuenta con 3 puertas [Figura 3.3 (j)] ubicadas en la parte inferior, para colocar la leña y permitir la entrada de aire necesario para la combustión de la misma y de los gases pirolíticos. Posee en la parte media, dos agarraderas que permiten levantarla y colocarla [Figura 3.3 (i)].

La chimenea además de generar tiro, dirige las emisiones generadas a alturas mayores reduciendo la exposición de los operarios. Se coloca encima de la campana [Figura 3.3 (g)]. Las dimensiones de cada parte del carbonizador se detallan en el Apéndice 1.

Simbología

- a: Tapa
- b: Barril modificado (0,2 m³)
- c: Codo
- d: Tubería
- e: Codo
- f: Codos
- g: Chimenea
- h: Campana hueca
- i: Agarradera
- j: Puerta
- k: Sitio de medición de la temperatura.

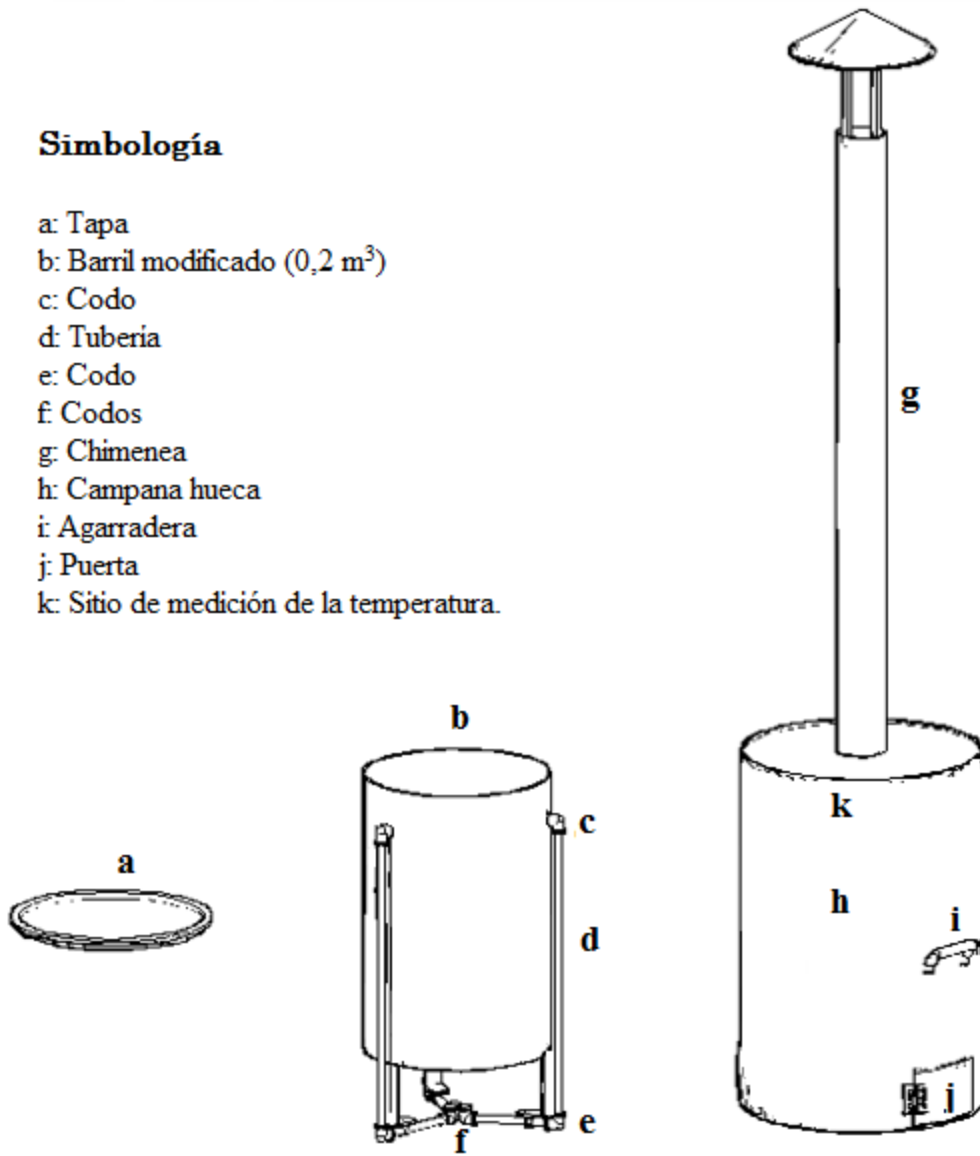


Figura 3.3 Partes del carbonizador

Seguidamente se muestran fotografías del carbonizador (Figura 3.4.)



Figura 3.4 Partes del carbonizador evaluado

3.2.2 Procedimiento utilizado para la carbonización de los residuos biomásicos.

El método de la carbonización consistió en los siguientes pasos:

- a. Se procedió al llenado del reactor, donde las piezas largas se colocaron en forma vertical y los trozos pequeños se colocaron encima rellenando espacios, procurando dejar espacios libres para la circulación de los gases, y evitando tapar el fondo del mismo (Figura 3.5).



Figura 3.5 Colocación de la biomasa en el barril.

- b. Se tapó el reactor, se colocó la campana sobre el reactor y encima la chimenea.
- c. Se colocó una cantidad de leña suficiente debajo del barril a través de las puertas de la campana [Figura 3.3 (j)] y seguidamente se encendió.
- d. Se continuó colocando leña según se consumía, hasta que se iniciara la etapa autosostenida, donde se generan los gases pirolíticos que mantienen la temperatura. Esta etapa se identificó al percibir un sonido, y al observar la incineración de los gases que salían de los tubos correspondientes. [Figura 3.3 (f)]. Durante esta etapa no se colocó más leña.
- e. Al observar la disminución de la salida de los gases por las tuberías [Figura 3.3 (f)], se colocó una carga final de leña.
- f. Cuando se enfrió el sistema se retiró la campana, y se trasladó el carbón a un saco.

3.2.3 Metodología empleada para la caracterización y adecuación de los residuos a carbonizar

3.2.3.1 Según especies.

La identificación de las especies fue realizada por el Dr. Roger Moya, de la Escuela de Ingeniería Forestal.

3.2.3.2 Secado al aire

Se aplicó el método de secado al aire, donde los materiales se expusieron a las condiciones ambientales; temperatura, humedad relativa y velocidad de circulación del viento del lugar (Córdoba, 2005).

Se manejó un tiempo de secado de 3 semanas en exposición al sol, si el grosor del lado de mayor longitud del material era de 2 cm, y cuando fue mayor el grosor se expuso por 6 semanas, igualmente la biomasa se volteó para lograr que el material se secase por igual (Quesada, J. Comunicación personal. 18 de agosto, 2014).

3.2.3.3 *Contenido de humedad de la madera*

El contenido de humedad de los residuos (aplicado el secado al aire), se realizó de acuerdo a la norma ASTM D-4442. Para esto se tomaron muestras al azar de la parte central y los extremos de diferentes reglas (unas gruesas, otras de menor grosor), para cada una de las carbonizaciones.

3.2.3.4 *Poder calórico de la materia prima.*

La determinación del contenido calórico se realizó mediante la norma ASTM D-5865.

3.2.3.5 *Reducción de tamaño de los residuos biomásicos.*

Las piezas que poseían una altura mayor o igual a la del barril, se cortaron para poder colocarlas en el mismo.

3.2.4 Aspectos evaluados del carbonizador

El carbonizador se evaluó mediante aspectos como el rendimiento de producción del carbón, el consumo de biomasa para combustible, los tiempos y procesos, la generación de humo en las diferentes etapas del proceso, así como las temperaturas, y también se evaluó la calidad del carbón.

Con el fin de obtener resultados confiables se realizaron 3 ensayos de carbonización por residuo.

A continuación se detalla cada aspecto evaluado.

3.2.4.1 *Rendimiento de producción del carbón.*

El rendimiento de producción se calculó considerando la masa de la biomasa que se colocó en el reactor, y la masa del carbón producido. El carbón fue pesado inmediatamente después de almacenarlo en el saco.

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{masa del carbón}}{\text{masa de la biomasa}} * 100$$

Ecuación 3.2.1

3.2.4.2 Consumo de leña.

El porcentaje de consumo de leña se determinó registrando la masa de la biomasa que se utilizó con este fin, y masa de la biomasa que se colocó en el reactor.

$$\% \text{ consumo de leña} = \frac{\textit{masa de leña}}{\textit{masa en el reactor} + \textit{masa de leña}} * 100$$

Ecuación 3.2.2

3.2.4.3 Estimación de tiempos y procesos

Además del registro de los procesos, también se estimó el tiempo requerido en cada uno, desde la colocación del material biomásico en el reactor hasta la descarga del carbón.

3.2.4.4 Generación de humo

En las diferentes etapas del proceso se realizaron observaciones sobre la emisión de humo, ya que uno de los propósitos del reactor es minimizar las emisiones de humo en el proceso de carbonización, dado que el humo es un contaminante característico de muchos de los métodos usuales de carbonización.

3.2.4.5 Temperaturas registradas en la carbonización.

En 3 de los 6 ensayos de carbonización se midió la temperatura en la parte superior de la campana (Figura 3.3), mediante termocuplas tipo K.

3.2.4.6 Caracterización del carbón.

El carbón se caracterizó con respecto a sus propiedades físicas: propiedades organolépticas, densidades, contenido de humedad, resistencia a la compresión y sus propiedades químicas: contenido de volátiles, contenido de cenizas, poder calórico y carbono fijo. Las muestras para realizar dichas pruebas se tomaron según lo establecido en el Apéndice 2.

Estas pruebas se desarrollaron en los laboratorios del CIIBI del ITCR, con excepción del poder calórico que se realizó en los laboratorios del CEQIATEC (Centro Químico de Investigación y Asistencia Técnica). Asimismo se realizaron pruebas de germinación y

pruebas de rechazo por lombrices para determinar el potencial del carbón como enmienda en el suelo, las cuales se llevaron a cabo en el Vivero Forestal del ITCR.

3.2.4.6.1 Propiedades del carbón.

3.2.4.6.1.1 Propiedades físicas

En el siguiente cuadro se presenta la metodología utilizada para determinar las propiedades físicas evaluadas al carbón.

Cuadro 3.1 Metodología empleada para determinar las propiedades físicas del carbón

Propiedad	Definición aplicada	Método
Organolépticas (Sonido, color, olor)	-	Mediante los sentidos.
Densidad del carbón	$p = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$	Masa / volumen (Principio de Arquímedes) Se midió la masa de una pieza de carbón elegida al azar, y se determinó su volumen a través del Principio de Arquímedes (el fluido utilizado fue agua, cuya densidad se tomó como 1,00 g/cm ³)
Densidad de bulto	$p = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$	Masa / volumen (Se vertieron piezas de carbón en desorden, hasta llenar un recipiente de volumen conocido)
Resistencia a la compresión	$\text{Esfuerzo} = \frac{\text{Fuerza máxima}}{\text{Área de la probeta}}$	ASTM143-14 Compresión paralela a las fibras. Velocidad: 0,4 mm/min, Porcentaje de rotura: 5 %
Contenido de humedad (CH)	$\%CH = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso seco}}{\text{Peso inicial}}$	ASTM D1762-84 (2003) Peso seco: Sometido a 103°C en un horno por 24 h.

Las densidades tienen una utilidad práctica para consideraciones de producción, empaque y transporte.

3.2.4.6.1.2 Propiedades químicas

En el siguiente cuadro se presenta la metodología utilizada para determinar las propiedades químicas evaluadas al carbón.

Cuadro 3.2 Metodología empleada para determinar las propiedades químicas del carbón

Propiedad	Definición aplicada	Método
Contenido de volátiles (CV)	$CV (\%) = \left[\frac{(B - C)}{B} \right] * 100$	ASTM D1762-84 (2003)
Contenido de cenizas (CC)	$CC (\%) = \left[\frac{D}{B} \right] * 100$	
Poder calórico (PC)	$PC \left(\frac{kJ}{g} \right) = \frac{\Delta Temperatura (^{\circ}C)}{masa (g)} * Cv \left(\frac{kJ}{^{\circ}C} \right)$ <p style="text-align: center;">Cv: Coeficiente de calibración</p>	ASTM D-5865
Carbono fijo (CF)	$CF (\%) = 100 - (CH + CV + CC)$	ASTM D-3172

B: gramos de muestra después de secada a 105°C. C: Gramos de muestra después de ser sometida a 950°C. D: gramos de residuo.

Seguidamente se detalla la metodología utilizada para determinar el poder calórico del carbón del residuo de la construcción.

Este residuo se tenía molido, por lo que para analizar su poder calórico fue necesario aglomerarlo. Para esto se tomó una masa de 9 gramos de cada muestra y se le colocó 1 g de almidón de yuca como aglomerante, y 30 mL de agua. Luego de mezclar bien se calentó en un horno de microondas por 30 segundos, se mezcló la masa, se extendió sobre papel de aluminio (Figura 3.6), y se colocó al horno a 105 °C por dos horas. El material se dejó a

temperatura ambiente por una semana, y luego se partió en 10 trozos para determinar su contenido calórico.

Para medir el poder calórico del almidón, se preparó una mezcla de almidón con agua, 10 g de almidón y 30 mL de agua, se calentó en el microondas por 15 s, y finalmente se le agregaron 5 g de almidón logrando una masa seca. Luego se colocó en el horno por 2 horas, y finalmente se partió en 10 trozos, a los cuales se les determinó su contenido calórico.

El contenido calórico del carbón se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$PCc = \frac{\overline{PCca} - 0,1\overline{PCa}}{0,9}$$

Donde:

PCc: Poder calórico del carbón (MJ/kg)

PCca: Poder calórico de la mezcla carbón-almidón (MJ/kg)

PCa: Poder calórico del almidón. (MJ/kg)

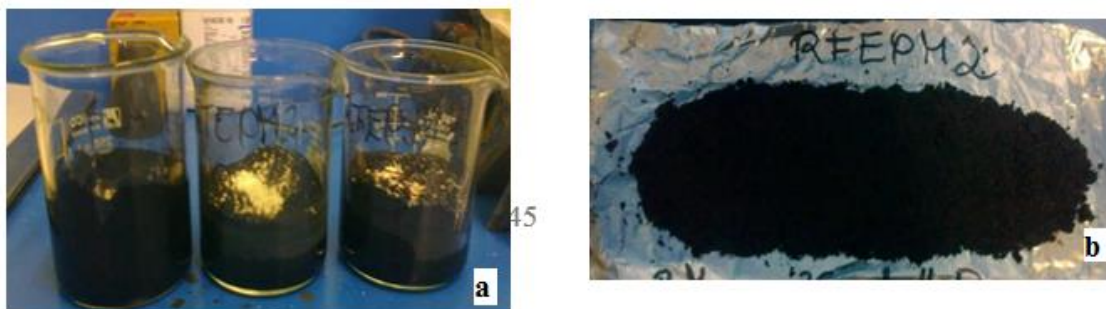


Figura 3.6 Preparación de la mezcla de carbón con almidón b) Aglomerado de carbón del residuo de la construcción con almidón para evaluar el poder calórico.

3.2.4.6.2 Pruebas preliminares para conocer el potencial del carbón como enmienda en el suelo.

Para determinar el potencial del biocarbón en el suelo se realizaron dos pruebas preliminares, la prueba de germinación de semillas de rábano y la prueba de rechazo por lombrices. Estas pruebas se realizaron tomando como referencia la guía básica para ensayos de biochar (Technical Bulletin #104) en el suelo del IBI (International Biochar Initiative).

3.2.4.6.2.1 Prueba de germinación.

En la prueba de germinación se evaluaron sustratos preparados con tierra apta para cultivar y biocarbón [Sustrato con Biocarbón (SB)] generado en cada una de las tres carbonizaciones

realizadas por residuo y también los sustratos que contenían únicamente tierra [Sustrato control (SC)].

Los SB se prepararon al 1 %, 5 % y al 10 % de biocarbón, y se realizaron cuatro repeticiones por tratamiento, y también se prepararon los SC por quintuplicado.

Cada sustrato se colocó en cajas Petri, en el que se sembraron 20 semillas de rábano por caja (Figura 3.7), y posteriormente se regaron manualmente con 35 mL de agua. Durante los siguientes 5 días se regaron con 15 mL de agua por día, y se realizó el registro diario de la germinación de las semillas (Figura 3.7)



Figura 3.7 a) Siembra de las semillas de rábano b) Germinación de las semillas

3.2.4.6.2.2 Prueba de rechazo por lombrices

Al igual que la prueba de germinación, esta prueba se realizó preparando SB, variando las concentraciones de carbón al 1 % y al 5 % para cada ensayo de carbonización. Se probó el carbón de los seis ensayos de carbonización, correspondientes a los dos residuos biomásicos, y se realizaron 4 repeticiones para tener datos certeros.

Se prepararon los sustratos en las concentraciones a evaluar y los SC, los cuales se humedecieron 24 horas antes de su evaluación. Para esto se prepararon los sustratos y se colocaron por aparte en recipientes que contenían filtros, y se les adicionaron 35 mL de agua, logrando humedecer por el completo el sustrato.

Al transcurrir el lapso, se colocó un separador en el recipiente para dividir los sustratos, se adicionó el SB y finalmente se adicionó el volumen de suelo (SC) equivalente al SB (Figura 3.8). Luego se procedió a retirar el separador, y colocar 8 lombrices de tierra (*Eisenia foetida*)

en la línea divisoria (Figura 3.8), se taparon los recipientes y se colocaron en un lugar oscuro, por 48 horas.



Figura 3.8 a) Colocación del separador y los sustratos. SB: Sustrato con biocarbón. SC: Sustrato control b) Colocación de las lombrices

Transcurrido el periodo, se contabilizaron las lombrices presentes en cada sustrato (Figura 3.9). Cuando las lombrices se encontraban en medio de los dos sustratos se le asignó un valor de 0,5 a cada sustrato.



Figura 3.9 Conteo de las lombrices.

3.2.5 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante medidas de tendencia central y el análisis de la varianza (ANOVA) de un factor, a través del *software* estadístico Minitab® 17.2.1. Se utilizó esta prueba, ya que permite comparar las medias de dos grupos o más simultáneamente (Park, 2009).

El ANOVA de un factor se utilizó con el fin de identificar si existían variaciones significativas entre las medias de los parámetros analizados para los residuos biomásicos, y

para el carbón. Al analizar los rendimientos y el consumo de leña, se consideró como factor de varianza el tipo de residuo o sustrato.

En el análisis de la caracterización de los dos residuos biomásicos, y sus carbones, el factor de varianza empleado fue el ensayo de carbonización, y los niveles fueron 3, representando los tres ensayos de carbonización realizados por residuo biomásico, los cuales se llevaron a cabo en días diferentes. Igualmente se realizó el análisis considerando como factor la materia de partida, por lo tanto había dos niveles, correspondientes a cada uno de los residuos evaluados.

En las pruebas de la aplicación del carbón en el suelo, el factor de varianza fue la concentración de carbón que contenían los diferentes sustratos, y luego se realizaron las comparaciones por ensayo de carbonización. Igualmente con este análisis se compararon las medias de los parámetros analizados entre ambos residuos y carbones.

En los diferentes análisis, si se encontraba diferencia significativa (aceptación de la hipótesis alternativa) se procedía a efectuar la prueba de Tukey al 95 % de confianza, mediante el mismo software, para determinar cuáles medias eran significativamente diferentes.

3.3 POTENCIAL ANUAL DE LOS RESIDUOS

El potencial anual de los residuos se evaluó tomando en cuenta las cantidades de residuos que se generan en cada uno de los casos, el carbón que se puede producir, el valor calórico que contiene el carbón, y su valor comercial. En los cálculos del valor comercial del carbón no se consideraron los egresos que se derivan de los procesos.

El potencial anual del residuo de tarimas corresponde al residuo generado en la empresa Maderas Bosque Verde. En cambio, para el residuo de la construcción, su potencial se estimó con base a la cantidad de residuos de madera que se generaron el año 2014, en la construcción de casas de habitación en Costa Rica.

3.3.1 Potencial anual del residuo de tarimas de la empresa Maderas Bosque Verde.

Seguidamente se muestran los datos con los que se estimó el potencial anual del residuo tarimas y la forma en que se obtuvieron:

El índice de generación del residuo de tarimas. Se consultó la generación de este residuo a los propietarios de la empresa Madera Bosque Verde.

El rendimiento de producción del carbonizador. Este dato corresponde al porcentaje de rendimiento obtenido en la evaluación del carbonizador al valorizar este residuo.

El consumo de leña. Se utilizó el dato del consumo promedio de leña de este residuo.

El poder calórico del carbón, corresponde al obtenido mediante las calorimetrías realizadas al carbón de tarimas.

El precio promedio de venta del carbón comercial, consultado en dos supermercados.

A continuación se presentan las ecuaciones empleadas para determinar el potencial anual del residuo.

Cálculo del carbón que se puede producir a partir del residuo de tarimas (CT).

Mediante el dato de la generación del residuo de tarimas (R), el rendimiento obtenido en el carbonizador para este residuo (%R) y el consumo de leña promedio por ensayo de carbonización (% L) , se estimó la cantidad de carbón que se puede producir.

$$C(t) = [R(t) * (1 - \% L)] * \%R$$

Ecuación 3.3.1

Determinación del valor calórico del carbón.

Con el resultado obtenido en el cálculo anterior del carbón que se podría generar (CT) y considerando el poder calórico determinado para este residuo (PC), se estimó el valor calórico de carbón (VC).

$$VC(GJ) = CT(t) * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} * PC \left(\frac{MJ}{kg} \right) * \frac{10^6 \text{ J}}{1 \text{ MJ}} * \frac{1 \text{ GJ}}{10^9 \text{ J}}$$

Ecuación 3.3.2.

Valor comercial del carbón

Considerando la cantidad de carbón que se puede generar con los residuos, y tomando en cuenta el precio de venta del carbón se le asignó un valor anual al carbón que se podría producir con los residuos generados

$$\text{Valor comercial anual (CRC)} = CT(t) * \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ t}} * \text{precio de venta} \left(\frac{\text{CRC}}{\text{kg}} \right)$$

Ecuación 3.3.4.

3.3.2 Potencial anual del residuo de la construcción generado en obras de casas.

Seguidamente se muestran los datos con los que se estimó el potencial anual de los residuos maderables que se generan en la construcción de las casas de habitación en Costa Rica, y la forma en que se obtuvieron:

Se consideró el **índice de generación del residuo de madera de la construcción** I_G de $0,8461 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$, obtenido por Abarca, L. (2014) para la construcción de una casa de habitación de 190 m^2 , ubicada en el área metropolitana donde se da la mayor cantidad de construcciones en el país.

Se utilizó el **índice de construcción habitacional** (I_C) en Costa Rica (CFIA, 2014) para el año 2014, que fue de $1\ 769\ 673 \text{ m}^2$.

Se utilizó el **rendimiento de producción del carbonizador** obtenido al valorizar el residuo de la construcción, con el fin de determinar la cantidad de carbón que se podría generar.

Se utilizó el dato del **consumo promedio de leña** de este residuo.

Se empleó el **poder calórico del carbón del residuo de la construcción**, para estimar el valor calórico del carbón.

Se utilizó el **precio promedio del carbón comercial**.

Seguidamente se muestran las ecuaciones aplicadas.

Estimación de la generación del residuo madera en la construcción anual de casas de habitación en Costa Rica.

Mediante el índice de generación del residuo madera de la construcción (I_G) y el índice de Construcción habitacional (I_C) en Costa Rica del año 2014, se estimó la cantidad de residuos de madera generados en la construcción de viviendas en el país.

$$R(Ton) = \dot{G} \left(\frac{kg}{m^2} \right) * \dot{I}_c(m^2) * \frac{1 ton}{1000 kg}$$

Ecuación 3.3.5.

Con el fin de estimar la producción de carbón, el valor calórico del carbón que se podría obtener, y el valor comercial del carbón, se utilizaron las ecuaciones Ecuación 3.3.2., Ecuación 3.3.3, Ecuación 3.3.4., Ecuación 3.3.5., respectivamente, descritas anteriormente, únicamente que considerando el rendimiento del carbonizador, y el poder calórico del carbón del residuo de la construcción.

3.4 COSTO MONETARIO DE DISPONER LOS RESIDUOS EN EL RELLENO SANITARIO.

Con el fin de estimar el costo monetario anual que le podría implicar a la empresa Maderas Bosque Verde disponer en el relleno sanitario sus residuos, se solicitó a WPP (empresa dedicada a la recolección, transporte, manejo y disposición de residuos sólidos), una cotización de las tarifas de costo de la disposición y transporte del residuo al relleno sanitario Los Pinos, el cual es el más cercano a Maderas Bosque Verde.

Para estimar los costos anuales de disposición y transporte de residuos de madera de la construcción en rellenos sanitarios, se empleó el estudio de caso utilizado para determinar el potencial anual del residuo, para lo que se solicitaron las tarifas de disposición y transporte a la empresa WPP. Con el fin de realizar un estimado del costo que podría implicar el transporte de estos residuos, y considerando que los residuos se generan en diferentes lugares del área metropolitana, se eligió analizar dos casos, uno considerando que la totalidad de los residuos se generaron a 10 kilómetros del relleno sanitario, y el otro considerando que la fuente de generación se ubicara a 20 km del relleno sanitario.

Mediante las tarifas de disposición por tonelada brindadas por la empresa, y las cantidades generadas del residuo (R) (obtenidas según se menciona el apartado anterior), se estimó el costo por disposición de los residuos en el relleno sanitario.

$$\text{Costo de disposición (CRC)} = R(t) * \text{Tarifa de disposición} \frac{(CRC)}{t}$$

Ecuación 3.4.1.

Para calcular el costo de transporte a un relleno sanitario, se supuso el traslado de los residuos en un contenedor de volumen de 25 m³. Se estimó un aprovechamiento del 75% del volumen del contenedor para los residuos de la madera de la construcción. En cuanto a los residuos de tarimas, al estar empacados o en sacos, se consideró que se podría aprovechar el 90 % del volumen del contenedor.

$$V_c = V(m^3) * F(\text{factor de aprovechamiento})$$

Ecuación 3.4.2

Conociendo el volumen que se podría ocupar el carbón de cada residuo y considerando su densidad de bulo se determinaron los kg que se podrían trasladar por contenedor.

$$\frac{kg}{\text{Contenedor}} = \frac{V_c(m^3)}{\text{Contenedor}} * \rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

Ecuación 3.4.3.

Con este dato y el de la cantidad de residuos que se generan (R) se estimó el número de contenedores necesarios para trasladar el residuo, resultado con el cual se calculó el costo de transporte.

$$\text{Contenedores} = \frac{R(kg)}{\left(\frac{kg}{\text{contenedor}} \right)}$$

Ecuación 3.4.4.

$$\text{Costo de transporte (CRC)} = \text{Viajes (Contenedores)} * \text{Tarifa de transporte} \left(\frac{\text{CRC}}{\text{viaje}} \right)$$

Ecuación 3.4.5.

$$\text{Costo (CRC)} = \text{Costo de transporte} + \text{costo de disposición}$$

Ecuación 3.4.6.

Finalmente se realizó una comparación entre el costo monetario que implica el manejo de estos residuos en el relleno sanitario, versus el valor comercial.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 EVALUACIÓN DE LA CARBONIZACIÓN

Inicialmente se presenta la caracterización y adecuación de los residuos a carbonizar, luego se muestra la evaluación del carbonizador en cuanto a su rendimiento, funcionamiento y la calidad del carbón obtenido.

4.1.1 Caracterización de la biomasa

4.1.1.1 Según especies y su condición

El residuo biomásico de tarimas estaba compuesto únicamente de la especie *Gmelina arborea* sp., el cual estaba limpio, y fresco, igualmente se observó que el material estaba compuesto por reglas de poco espesor.

El material de la construcción estaba compuesto por una amplia variedad de especies por lo que se caracterizaron las especies más representativas, que fueron: *Anacardium excelsum* (Caracolí), *Cupressus lusitanica* Mill sp (Ciprés), *Vochysia guatemalensis* Donn Sm. Guatemala sp (Cebo), *Laurus nobili* sp (Laurel), *Pentandra* sp (Ceiba), *Vochysia ferruginea* sp (botarrama), *Samanea saman* sp (cenízaro), y también se identificaron materiales compuestos como el *plywood*. La mayoría del material poseía adherido tierra y cemento, además algunas piezas tenían signos de degradación biológica. También contenía piezas de tamaños muy variados (tablas muy anchas, de poco espesor, y reducida longitud).

4.1.1.2 Contenido de humedad.

El residuo de tarimas presentó un contenido de humedad que varió de 14 % a 18 %, y el residuo de construcción presentó un promedio de humedad de 11 % (Cuadro 4.1).

Al comparar las medias del contenido de humedad de las tarimas se obtuvo que no presentan una variación significativa entre ensayos de carbonización ($P > 0,05$) (Apéndice 6)

Se determinó que las medias del contenido de humedad de ambos residuos, son significativamente diferentes ($P < 0,05$) (Apéndice 6). La biomasa del residuo de la construcción presentó los porcentajes más bajos de humedad.

A pesar de las diferencias encontradas en el contenido de humedad, los dos residuos contenían un porcentaje óptimo para su carbonización, ya que era menor al 30 % (FAO, 1983).

El poder calórico determinado para la biomasa de tarimas no varió significativamente entre ensayos de carbonización ($P > 0,05$) (Apéndice 6). Como se mencionó este residuo corresponde a una única especie que es la *Gmelina arborea*. Moya et al. (2011) midieron un poder calórico de 16 MJ/kg, en condición seca al 12 % de humedad. Para el residuo de tarimas el poder calórico fue de un promedio de 18 MJ / kg, en condición seca al 16 % promedio de humedad (Cuadro 4.1).

Para el residuo del residuo de la construcción se cuantificó un poder calórico promedio de 18 MJ/kg, en condición seca al 11 % promedio de humedad (Cuadro 4.1).

Analizando las medias del poder calórico de ambos residuos en estudio, se encontró que no hay una variación significativa ($P > 0,05$) (Apéndice 6 Cuadro A. 7.6.7), por lo tanto presentan un poder calórico muy semejante.

Cuadro 4.1 Contenido de humedad y poder calórico del residuo biomásico de tarimas y del residuo de la construcción

Parámetro	Residuo	Media
Contenido de humedad (%)	Tarimas	16 ^a ± 4 ^b
	De la construcción	11 ^a ± 1 ^b
Poder calórico (MJ/kg)	Tarimas	18 ^a ± 2 ^b
	De la construcción	18 ^a ± 2 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

4.1.2 Aspectos evaluados al carbonizador

4.1.2.1 Rendimiento de producción de carbón

El rendimiento de producción del carbón de residuos de tarimas osciló entre 30 % y 33 %, con un promedio fue de 32 % aproximadamente (Cuadro 4.2).

Para las carbonizaciones realizadas con el residuo de la construcción se obtuvieron porcentajes de rendimiento más bajos, que fluctuaron de 28 % a 30 %, presentando una media de 29 % (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2 Rendimiento de producción del carbón de tarimas y el residuo de la construcción

Parámetro	Residuo	Media
Rendimiento (%)	Tarimas	32 ± 1
	Del residuo de la construcción	29 ± 1

Se determinó que los rendimientos de producción no variaron significativamente con respecto al residuo ($P > 0,05$) (Apéndice 5).

Tanto el rendimiento del residuo de tarimas como el de la construcción, son muy buenos con respecto a los obtenidos en otros métodos que se utilizan comúnmente, como: fosas de tierra, hornos de ladrillo y parvas, (Cuadro 2.2). Asimismo, el carbonizador evaluado en este trabajo presentó mejores porcentajes de rendimiento, que los esperados para este tipo de hornos que es de 26 % (FAO, 1983) y fueron semejantes a los mostrados en el sistema mejorado de producción de carbón (SMP) desarrollado en la India y en África que van del 30 al 40 % (Adam, 2009). Aquí el carbonizador evaluado tiene la ventaja de ser transportable.

El menor rendimiento del segundo residuo se podría deber a las características del material, ya que había material contaminado con tierra y cemento, había muchas piezas parcialmente podridas, y las piezas eran de formas y tamaños más variados, lo que dificultó su colocación en el barril. Asimismo, se debe considerar la variabilidad de las especies de este residuo. Otro factor que pudo haber afectado fueron las condiciones del reactor, ya que se detectó que el fondo del barril se había hundido, posiblemente producto de las altas temperaturas que se daban en el interior del mismo y del peso del material, lo que pudo dificultar que el calor suministrado durante el proceso se distribuyera homogéneamente.

4.1.2.2 Consumo de leña

El consumo promedio de leña para el residuo de tarimas fue de 35 % y para el residuo de la construcción fue de 33 % (Cuadro 4.3), se aprecia una variabilidad significativa para el residuo de la construcción ($P < 0,05$), lo cual puede ser consecuencia de la heterogeneidad del

residuo. Sin embargo, el consumo de leña requerido no varió significativamente entre residuos ($P>0,05$) (Apéndice 7).

Cuadro 4.3 Consumo de leña en cada ensayo de carbonización, con respecto a la carga del barril

Parámetro	Residuo	Media
Consumo de leña (%)	Tarimas	$35^a \pm 2^b$
	Del residuo de la construcción	$33^a \pm 8^b$

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

El consumo de leña se podría reducir si se diera un mayor aprovechamiento del calor generado en el reactor. Esto podría lograrse instalando otros reactores paralelos al evaluado y aprovechando el calor de un proceso para poner en marcha el siguiente, o bien para otros propósitos como el secado del material. El calor residual también se podría aprovechar en otras actividades ajenas al proceso de carbonización, como lo es el calentamiento de agua, entre otras.

4.1.2.3 Tiempos y procesos

La determinación de los tiempos en el proceso es relevante ya que nos permite cuantificar cuánto tiempo tarda cada ensayo de carbonización, y por ende el uso que se le puede dar al carbonizador y las cantidades de carbón que se podrían generar en diferentes períodos. Este registro se realizó para las etapas principales del proceso de carbonización (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4 Tiempos promedios estimados en cada etapa de la carbonización

Etapas	Tiempo (minutos)
Adecuación del tamaño de la biomasa, y cargado del carbonizador	20
Calentamiento del reactor	115
Fase pirolítica	55
Calentamiento final	15
Enfriamiento	90
Total	295 min

El proceso global de la carbonización de una tanda tarda en promedio 295 minutos, es decir unas 5 horas.

En términos de funcionamiento de varios carbonizadores para la producción de carbón en mayores cantidades, se determinó que al transcurrir 1 hora de haber iniciado la etapa del calentamiento del reactor, el operador puede cargar otro carbonizador. Esto significa que en 8 horas de trabajo por día, se pueden realizar 4 tandas diarias, contando con 4 carbonizadores.

Cada tanda de carbonización presenta un rendimiento promedio de 14 kg de carbón, por lo que 56 kg de carbón pueden prepararse en una jornada de 8 horas. Esto equivale a unos 1250 kg de carbón mensuales.

Considerando una jornada de trabajo de 10 horas o más, y contando con 6 carbonizadores, se podrían producir hasta 10 toneladas de carbón por mes, trabajando la semana completa (Cuadro 4.5). Tomar en cuenta que en 10 horas se pueden hacer dos carbonizaciones con un reactor.

Cuadro 4.5 Número de carbonizadores y cantidad de carbón generado en una jornada laboral

Jornada laboral (h)	Reactores	Cargas/ día	kg carbón/ día	t carbón/ mes
8	5*	4	56	1,3
≥10	7*	6 – 24	84 – 336	1,9 – 7,5 **

*Se consideró una unidad de repuesto ** (más de 10 t/mes trabajando los fines de semana)

4.1.2.4 Humo.

Se observó al iniciar la fase pirolítica (III etapa, Cuadro 2.1), la emisión cuantiosa de humo (Figura 4.1). Esto significa que en ese periodo los gases pirolíticos no fueron completamente combustionados. Por lo tanto, es indispensable modificar el diseño del carbonizador a fin de minimizar sus emisiones de humo.



Figura 4.1 Emisión de humo en el carbonizador en la fase pirolítica

4.1.2.5 Temperaturas.

La Figura 4.2 muestra la temperatura registrada en las diferentes etapas del ensayo de carbonización número 3 del residuo de la construcción, el cual fue representativo de los demás ensayos. Las temperaturas se tomaron en la parte superior de la campana. En esta figura se observa que la máxima temperatura que se presentó en la carbonización fue mayor a los 600 °C (temperatura adecuada para obtener un carbón de calidad), la cual se dio cuando se estableció la fase pirolítica. Las temperaturas dentro del barril podrían haber sido menores. Se observó que las temperaturas se elevaron abruptamente cuando se estableció la fase pirolítica, y al disminuir la salida de los gases pirolíticos disminuyó también la temperatura. Luego se observa en la etapa del calentamiento final con leña, donde la temperatura se incrementó. Finalmente se observa la reducción de las temperaturas al permitir el enfriamiento del carbonizador.

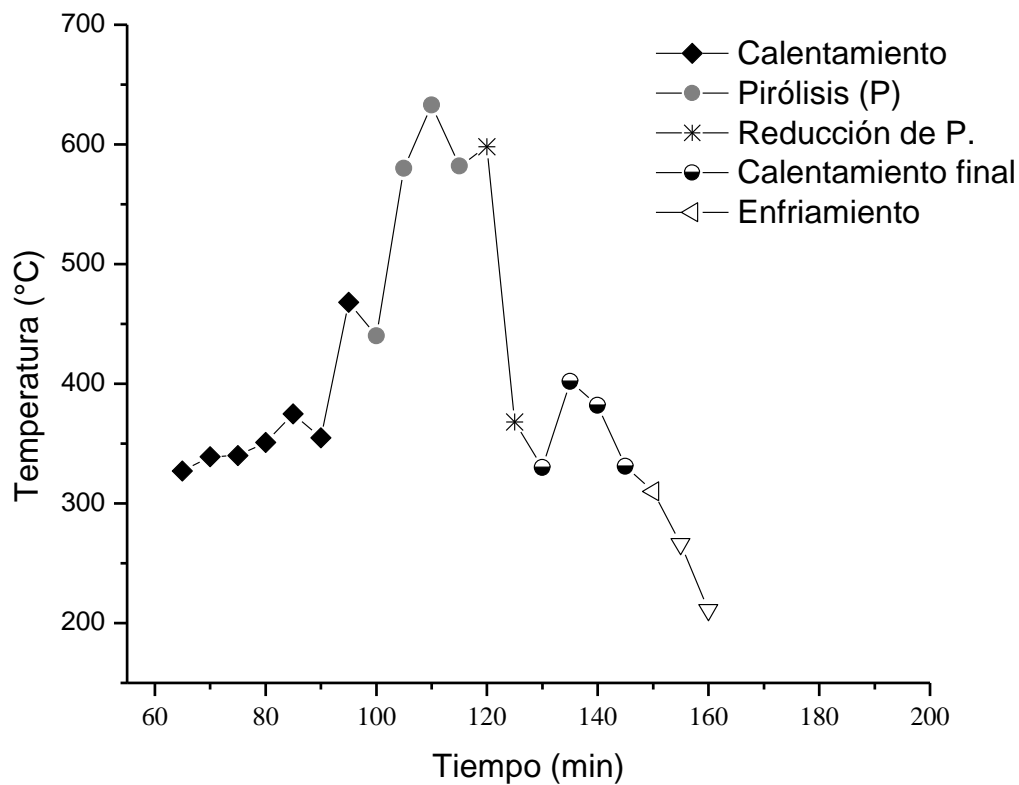


Figura 4.2 Temperaturas registradas en el tercer ensayo de carbonización del residuo de la construcción

A continuación se presentan las temperaturas registradas durante el ensayo de carbonización 2 y el ensayo de carbonización 3 del residuo de la construcción (Figura 4.3). En este gráfico se observa que el rango de temperaturas es similar, pero la fase pirolítica se dio más rápidamente en el ensayo de carbonización 2, lo que se pudo deber a la heterogeneidad del residuo, ya que al corresponder a diferentes especies, la composición química no es igual, y por lo tanto su poder calórico varía, además de la variación en el tamaño de las piezas y la forma en la que se empacó el material en el carbonizador. Igualmente al utilizar este material como leña, además de variar su poder calórico también varía su tiempo de ignición y el contenido de humedad del material.

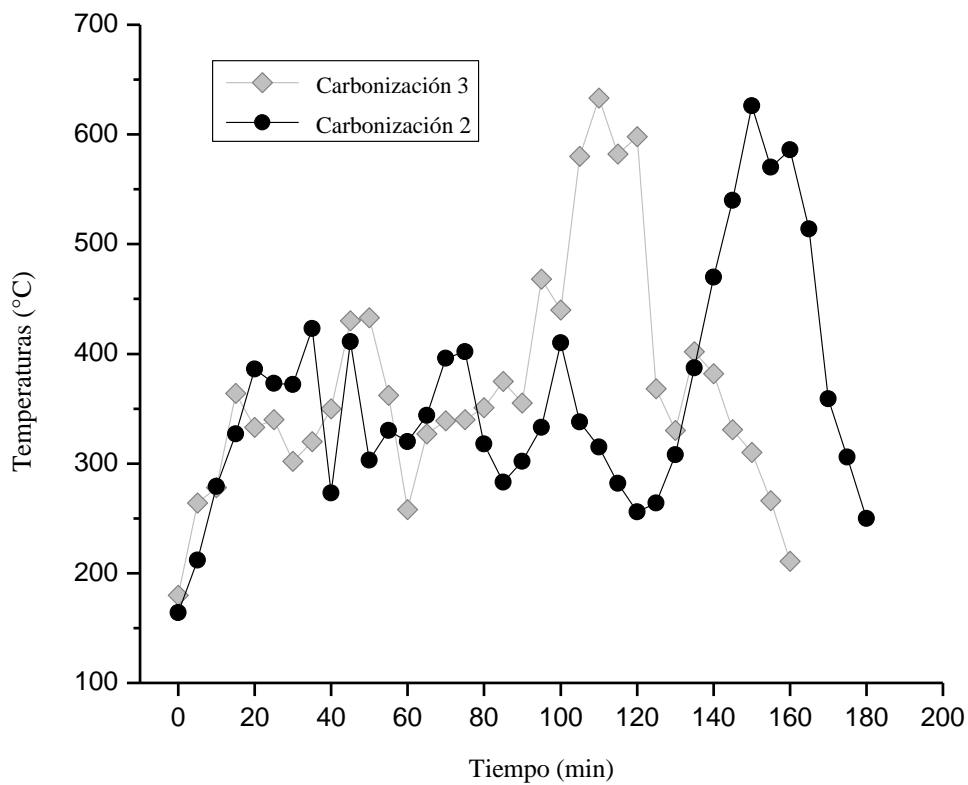


Figura 4.3 Temperaturas registradas en dos de las carbonizaciones del residuo de la construcción.

4.1.2.6 Problemas identificados en la operación del carbonizador y posibles mejoras.

Se identificó una cuantiosa generación de humo al iniciarse la fase pirolítica, por lo que es recomendable cambiar el diseño del quemador para mejorar la combustión de los gases. Otro problema detectado fue el desaprovechamiento del calor residual, por lo que se puede considerar rediseñar el sistema para utilizar el calor en otro reactor. Se detectó el deterioro del reactor al dejarlo a la intemperie, por lo que es fundamental mantenerlo cubierto para evitar su corrosión. Igualmente hubo dificultades para carbonizar piezas cortas, por lo que una posible solución sería diseñar espacios en el interior del reactor que permitan una mejor distribución de los residuos.

4.1.2.7 Caracterización del carbón.

A través de los resultados de estos parámetros y de acuerdo con la literatura se determinó la calidad del carbón en cuanto a sus propiedades físicas y químicas. También se evaluó preliminarmente mediante pruebas de germinación y la prueba de rechazo con lombrices, su potencial de enmienda en el suelo.

4.1.2.7.1 Propiedades físicas

4.1.2.7.1.1 Propiedades organolépticas

Como se enuncia en la revisión de literatura, propiedades como color azabache, poco olor y la sonoridad, son indicadores de calidad del carbón vegetal o biocarbón (Antal & Grønli, 2003).

Se determinó, de acuerdo a los indicadores mencionados que el carbón de tarimas fue de muy buena calidad, al presentar en la mayoría del material un color negro azabache, muy poco olor y bastante sonoridad (Cuadro 4.6).

Con respecto al carbón del residuo de la construcción, en el obtenido en las 2 primeros ensayos de carbonización se observó que el carbón era de calidad, sin embargo para el tercer ensayo de carbonización se observó una cantidad de piezas parcialmente carbonizadas (color café), y se percibió un olor fuerte a humo en el material (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6 Propiedades organolépticas del carbón de tarimas y del carbón del residuo de la construcción.

Residuo	Ensayo de carbonización	Propiedad		
		Color	Olor	Sonoridad
Tarimas	1		Muy poco olor	Como vidrio al dejarlo caer (piezas bien carbonizadas)
	2	Negro azabache, algunos trozos también presentaban color café oscuros	Muy poco olor	
	3		Poco olor	
De la construcción	1		Poco olor	
	2	Muy poco olor		
	3	Negro azabache, y algunos trozos cafés	Olor fuerte a humo	

Seguidamente se presentan fotografías del carbón obtenido de cada residuo.



Figura 4.4 a) Carbón del residuo de tarimas. b) Carbón del residuo de la construcción.

4.1.2.7.1.2 Densidad

La densidad del carbón es un dato importante para estimar el volumen del contenedor o el área donde se va almacenar, así como para estimar los costos que se pueden derivar al transportarlo.

4.1.2.7.1.2.1 Densidad del material

El carbón de tarimas presentó una densidad que varió de $0,25 \text{ g/cm}^3$ [s (desviación estándar) = $0,04 \text{ g/cm}^3$] a $0,28 \text{ g/cm}^3$ (s = $0,05 \text{ g/cm}^3$) en las carbonizaciones, y el de maderas de la construcción de $0,21 \text{ g/cm}^3$ (s = $0,05 \text{ g/cm}^3$) a $0,28 \text{ g/cm}^3$ (s = $0,08 \text{ g/cm}^3$) (Apéndice 8). Las medias de la densidad del carbón de tarimas (Cuadro 4.7) no variaron significativamente ($P > 0,05$) (Apéndice 8), tal como se esperaba.

Para el carbón del residuo de la construcción sí se evidenció una fluctuación significativa ($P < 0,05$), principalmente entre el ensayo de carbonización 1 y el ensayo de carbonización 3, lo cual se atribuye a la heterogeneidad del material (Apéndice 8). Al comparar estadísticamente las medias de la densidad de ambos carbones (Cuadro 4.7) se aprecian diferencias significativas ($P < 0,05$) (Apéndice 8).

Byrne & Nagle (1997), encontraron para carbones de diferentes especies que las densidades variaron de $0,07 \text{ g/cm}^3$ a $0,6 \text{ g/cm}^3$

Cuadro 4.7 Densidad del carbón de tarimas y del residuo de la construcción

Parámetro	Carbón	Media
Densidad	Tarimas	0,27 ^a ± 0,06 ^b
($\frac{g}{cm^3}$)	De la construcción	0,24 ^a ± 0,06 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

4.1.2.7.1.2.2 Densidad de bulto.

La densidad de bulto para el carbón de tarimas fluctuó de 0,15 g/cm³ (s = 0 g/cm³) a 0,17 g/cm³ (s=0,01 g/cm³) y el de maderas de la construcción de 0,18 g/cm³ (s = 0,02 g/cm³) a 0,20 g/cm³ (s = 0,02 g/cm³) (Apéndice 8). Al analizar las medias estadísticamente de la densidad de bulto de acuerdo a cada ensayo de carbonización, se obtuvo que no varían significativamente (P>0,05) (Apéndice 8.), lo que se esperaba al ser el mismo material en cada caso.

Las medias de densidad de bulto del carbón para cada uno de los residuos (Cuadro 4.8), presentaron diferencias estadísticamente significativas (P<0,05) (Apéndice 8), donde el carbón de tarimas presentó los valores más bajos de densidad.

Cuadro 4.8 Densidad de bulto del carbón de tarimas y del residuo de la construcción

Parámetro	Residuo	Media
Densidad de bulto ($\frac{g}{cm^3}$)	Tarimas	0,16 ^a ± 0,01 ^b
	De la construcción	0,19 ^a ± 0,01 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

4.1.2.7.1.3 Contenido de humedad.

La medias del porcentaje de contenido de humedad del carbón de tarimas fluctuaron de 5,0 % (s = 0 %) a 7 % (s = 1 %) (Apéndice 8), la variación entre ensayos de carbonización fue significativa (P<0,05) (Apéndice 8). Sin embargo, elucidar las razones de esta variación requeriría de un análisis que está fuera de los alcances de este trabajo.

Para este mismo residuo se analizó el contenido de humedad de las muestras de carbón de corteza, las cuales variaron de 7 % (s = 1 %) a 8,0 % (s = 0 %), y se obtuvo que no varían significativamente (P>0,05) (Apéndice 8).

Comparando las medias de la humedad entre el carbón de corteza y de madera, se obtuvo que existe diferencia significativa ($P < 0,05$) (Apéndice 8), dando mayor humedad en el carbón de corteza en 2 de los 3 casos.

Asimismo, para el contenido de humedad del carbón del residuo de la construcción que varió de 4 % ($s = 0$ %) a 6,0 % ($s = 0$ %), se halló que las medias de las tres carbonizaciones son estadísticamente diferentes ($P < 0,05$) (Apéndice 8). Explicar esta variación requeriría de un análisis que está fuera de los alcances de este trabajo.

Las medias de contenido de humedad de ambos carbones (Cuadro 4.9) son estadísticamente diferentes ($P < 0,05$) (Apéndice 8). A pesar de esta variación, ambos carbones cumplen con los estándares de calidad en cuanto este parámetro, que de acuerdo a la FAO (1983) debe ser de máximo 15 % (Cuadro 2.3) y según la Norma 1860-2 (Pacheco & Carmona, 2005), debe ser menor al 8 %. Igualmente al contener porcentajes de humedad menores al 10 % tienen menos probabilidades de desmenuzarse (FAO, 1983). Según el mismo autor este parámetro también es importante, porque es inversamente proporcional al contenido calórico.

Cuadro 4.9 Contenido de humedad del carbón de tarimas y del residuo de la construcción según ensayo de carbonización

Parámetro	Carbón	Media
	Tarimas	$6^a \pm 2^b$
Contenido de humedad (%)	Corteza de tarimas	$7^a \pm 1^b$
	De la construcción	$5^a \pm 0^b$

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

4.1.2.7.1.4 Resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión del carbón vegetal es una característica física importante, ya que si el carbón posee resistencias bajas, al transportarlo y manipularlo puede que se convierta en carbonilla fina o polvo (Benedicto et al., 1997).

El carbón de tarimas presentó una resistencia a la compresión que varió entre ensayos de carbonización de 69 kg/cm^2 ($s = 23 \text{ kg/cm}^2$) a 101 kg/cm^2 ($s = 18 \text{ kg/cm}^2$), los cuales son significativamente diferentes ($P < 0,05$) (Apéndice 8). Durante esta evaluación se notó que

algunas de las muestras seleccionadas del ensayo de carbonización 1 no estaban completamente carbonizadas, lo que pudo causar que estas presentaran mayor resistencia a la compresión.

El carbón del residuo de la construcción tuvo una resistencia a la compresión que varió en promedio de 63 kg/cm² (s = 20 kg/cm²) a 78 kg/cm² (s = 77 kg/cm²), medias que no varían significativamente entre ensayos de carbonización (P>0.05) (Apéndice 8).

Al comparar la resistencia a la compresión de ambos carbones (Cuadro 4.10) se encontró que no hay diferencia significativa entre los mismos (P>0,05) (Apéndice 8).

Cuadro 4.10 Compresión del carbón del residuo de tarimas y de residuo de la construcción

Parámetro	Carbón	Media
Compresión ($\frac{kg}{cm^2}$)	Tarimas	82 ^a ±23 ^b
	De la construcción	73 ^a ±18 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

4.1.2.7.2 Propiedades químicas

4.1.2.7.2.1 Contenido de volátiles

Las medias de los porcentajes del contenido de volátiles del carbón de tarimas sin corteza, variaron de 21 % (s = 9 %) a 30 % (s = 2 %). Las muestras de corteza de este mismo residuo tuvieron de 15 % (s = 9 %) a 24 % (s = 9 %) (Apéndice 8). Las medias no fueron significativamente diferentes entre ensayos de carbonización (P>0,05), caso contrario del residuo de la construcción, donde las medias fluctuaron de 12 % (s = 1 %) a 19 % (s = 1%) (Cuadro 4.11) y fueron significativamente diferentes (P<0,05) (Apéndice 8).

Los porcentajes de volátiles de ambos carbones (Cuadro 4.11) fueron significativamente diferentes (P<0,05) (Apéndice 8).

Cuadro 4.11 Contenido de volátiles del carbón de tarimas y del residuo de la construcción según ensayo de carbonización

Parámetro	Carbón	Media
	Tarimas	24 ^a ± 6 ^b
Contenido de volátiles (%)	Corteza de tarimas	20 ^a ± 9 ^b
	De la construcción	17 ^a ± 2 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

El carbón de tarimas presentó los porcentajes de volátiles más altos, lo cual según la FAO (1983) puede implicar que sea menos quebradizo que el carbón del residuo de la construcción, por lo que en su transporte y manipulación puede producir menos carbonilla fina, y ser más fácil de encender, sin embargo puede presentar una combustión menos limpia. Además que su ignición se dé más fácilmente no garantiza que sea un mejor combustible, ya que a mayor contenido de volátiles el contenido calórico se reduce (FAO, 1983). En las pruebas de resistencia mecánica se obtuvo un promedio levemente mayor para el residuo de tarimas, que sin embargo no fue significativo.

Según Antal & Gronli (2003), carbones como estos se recomiendan para el uso doméstico, ya que la calidad del carbón vegetal depende del uso que se le vaya a dar, donde para el uso doméstico el porcentaje de volátiles puede variar entre 25 % a 30 % (Cuadro 2.3).

4.1.2.7.2.2 *Contenido de cenizas*

La media del contenido de cenizas del carbón de tarimas no presentó diferencias significativas entre ensayos ($P > 0,05$); estas variaron de 2 % ($s = 0$ %) a 5 % ($s = 2$ %), al igual que las medias de carbón de corteza del mismo material que fluctuaron de 7 % ($s = 1$ %) a 12 % ($s = 6$ %) (Apéndice 8).

Los rangos de contenido de cenizas presentados por el carbón de tarimas indican que este carbón es de buena calidad, ya que se encuentran entre el rango establecido por Antal & Grønli (2003) que va de 0,5 % a 5 %, y según la norma EN-1860-2 puede ser de máximo 8 %. (Cuadro 4.12). El porcentaje de cenizas del carbón de corteza sí supera los límites de calidad.

Los resultados del carbón del residuo de la construcción mostraron variaciones significativas ($P < 0,05$) (Apéndice 8). Las medias fluctuaron de 9 % ($s = 1$ %) a 13 % ($s = 2$ %) (Cuadro

4.12), y superan el límite de calidad (Antal & Grønli, 2003). La variabilidad en el carbón del residuo de la construcción se puede deber a que según la FAO (1983) el contenido de cenizas varía de acuerdo a la especie, y la contaminación que posea la madera, y las formaleas estaban compuestas de una variedad de especies, además que la mayoría de piezas tenían tierra, cemento y arena adheridos.

El contenido de cenizas de ambos carbones (Cuadro 4.12) es estadísticamente diferente ($P < 0,05$) (Apéndice 7). El carbón del residuo de la construcción presenta los mayores porcentajes de cenizas (Apéndice 8) como era de esperarse por su mayor contaminación.

Cuadro 4.12 Contenido de cenizas del carbón del residuo de tarimas y del residuo de la construcción.

Parámetro	Carbón	Media
Contenido de cenizas (%)	Tarimas	3 ^a ± 1 ^b
	Corteza de tarimas	10 ^a ± 3 ^b
	De la construcción	11 ^a ± 2 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

4.1.2.7.2.3 Poder calórico

El poder calórico del carbón de tarimas de los 3 ensayos de carbonización presentaron un valor de 29 MJ/kg con una desviación estándar de $s = 2$ MJ/kg, $s = 3$ MJ/kg y $s = 4$ MJ/kg respectivamente, y en el carbón de corteza de tarimas varió de 23 MJ/kg ($s = 1$ MJ/kg) a 26 MJ/g ($s = 1$ MJ/kg) (Apéndice 8111). Para ambos carbones las medias del poder calórico no variaron significativamente entre ensayos de carbonización ($P > 0,05$) (Apéndice 8111).

En el carbón del residuo de la construcción este parámetro varió de 26 MJ/kg ($s = 0$ MJ/kg) a 29 MJ/kg ($s = 1$ MJ/kg) (Cuadro 4.15), con diferencias significativas entre ensayos de carbonización ($P < 0,05$) (Apéndice 8).

Cuadro 4.13 Poder calórico del carbón del residuo de tarimas y del residuo de la construcción.

Parámetro	Carbón	Media
Poder calórico (MJ/kg)	Tarimas	29 ^a ± 3 ^b
	Corteza de tarimas	24 ^a ± 1 ^b
	De la construcción	27 ^a ± 1 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

Comparando las medias de ambos carbones se identificó que existe diferencia significativa ($P < 0,05$) (Apéndice 8).

El mayor poder calórico lo presentó el carbón de tarimas [29 MJ/kg ($s = 3$ MJ/kg)], seguido del carbón del residuo de la construcción [27 MJ/kg ($s = 1$ MJ/kg)] y finalmente el carbón de corteza de tarimas [24 MJ/kg ($s = 1$ MJ/kg)] como se muestra en el Cuadro 4.13.

De acuerdo con la FAO (1983) y Antal & Grønli (2003), el poder calórico esperado en un buen carbón es de 28 MJ/kg a 33 MJ/kg (Cuadro 2.3), lo cual concuerda con el poder calórico presentado por el carbón elaborado de tarimas y del residuo de la construcción (considerando las incertidumbres), no así para el carbón de corteza (Cuadro 4.13); cuyo poder calórico no es despreciable, sin embargo.

4.1.2.7.2.4 Carbono fijo

El contenido de carbono fijo del carbón del residuo de tarimas varió de 63 % ($s = 1$ %) a 69 % ($s = 4$ %), y el del carbón del residuo madera de la construcción varió de 64 % ($s = 0$ %) a 73 % ($s = 0$ %) (Apéndice 8). Se encontró que no existe diferencia significativa entre los datos de los ensayos ni entre los dos residuos ($P > 0,05$), asimismo al analizar las medias de carbono fijo (Cuadro 4.14) (Apéndice 8).

Según la FAO (1985), ambos carbones se encuentran dentro de los rangos de buena calidad en cuanto a este parámetro (Cuadro 2.3),

Cuadro 4.14 Carbono fijo de los carbones según ensayo de carbonización

Parámetro	Carbón	Media
Carbono fijo	Tarimas	67 ^a ± 3 ^b
	De la construcción	67,3 ^a ± 0,2 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

4.1.2.7.3 Pruebas preliminares para conocer el potencial del carbón como enmienda en el suelo.

4.1.2.7.3.1 Prueba de germinación.

Analizando la germinación de semillas de rábano entre el sustrato control y los sustratos de las concentraciones de 0 %, 1 %, 5 % y 10 % de biocarbón de tarimas, se encontró que no presentan diferencias significativas entre muestras ni entre ensayos de carbonización ($P>0,05$) (Apéndice 8).

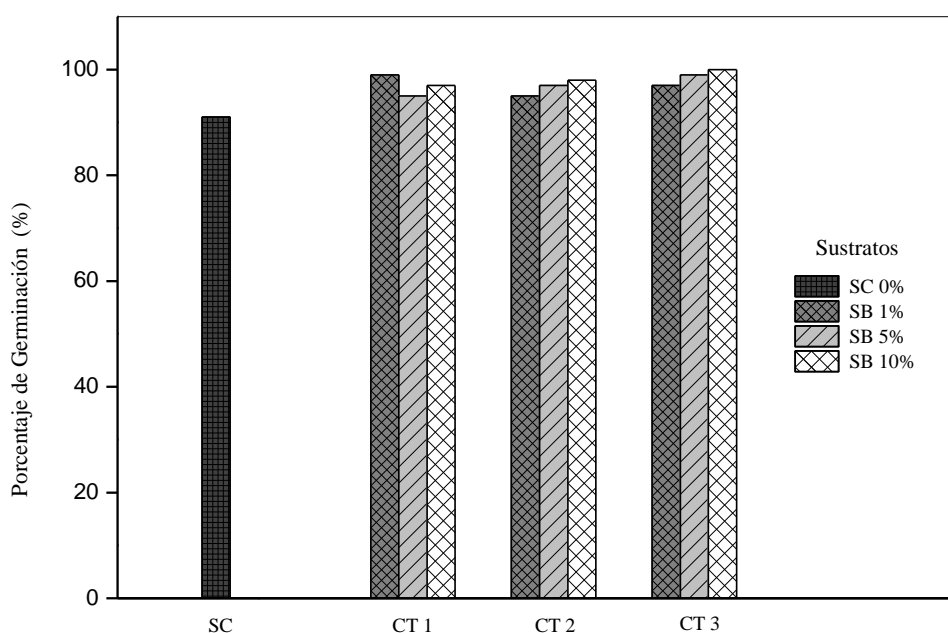


Figura 4.5 Porcentajes de germinación de semillas en sustratos con tierra y carbón de tarimas a diferentes concentraciones, y en sustratos de tierra (control).

En cuanto al carbón del residuo de la construcción se obtuvo que no existe variación significativa ($P>0,05$) (Apéndice 8) entre la germinación de semillas en el sustrato utilizado como control y los sustratos que contenían concentraciones de biocarbón al 1 %, 5 % y al 10 %, para cada una de las tres carbonizaciones. Sin embargo, al compararlas entre ensayos de carbonización se observan fluctuaciones significativas ($P<0,05$) (Apéndice 8) entre la germinación al 1 % de biocarbón del ensayo de carbonización 3, con respecto a las demás,

mostrando la media de menor germinación (Apéndice 8). Asimismo, se aprecia que el control y el sustrato al 10 % de biocarbón del segundo ensayo de carbonización son significativamente diferentes de los demás, presentando la media de germinación más alta (Apéndice 8).

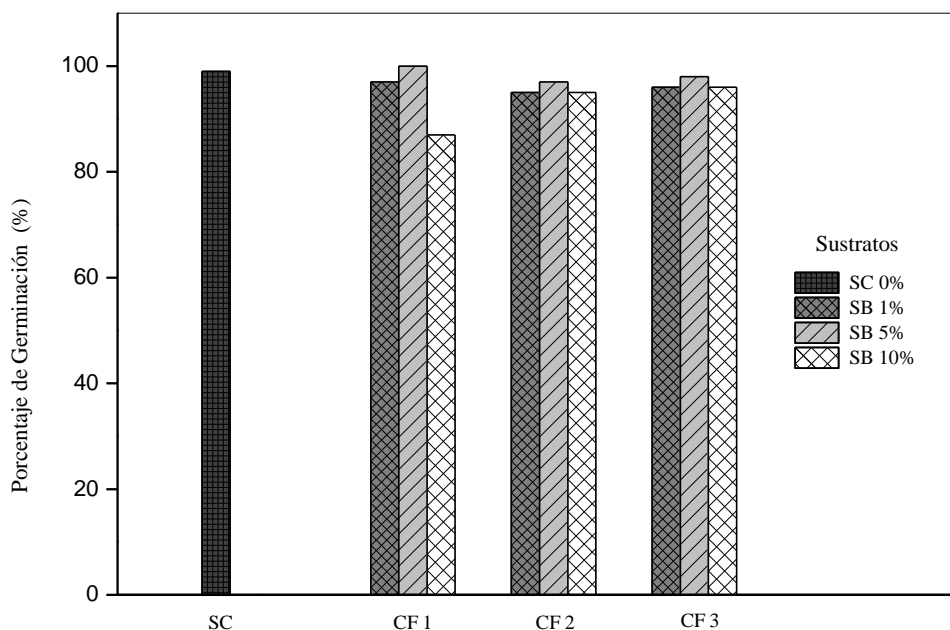


Figura 4.6 Porcentaje de germinación de semillas de rábano en sustratos con tierra y carbón del residuo de la construcción a diferentes concentraciones, y en sustratos de tierra (Control).

Se notó al dejar de regar las plantas que en los sustratos con menor concentración de biocarbón se marchitaron más rápido las plantas. Esta afirmación parece confirmar la capacidad de retención de agua del carbón, propiedad interesante investigar a fondo, considerando las sequías tan marcadas que se han presentado últimamente en el país, afectando el desarrollo de los cultivos.

4.1.2.7.3.2 Prueba de rechazo por lombrices

Al realizar la prueba de rechazo por lombrices en los sustratos de tierra preparados con concentraciones de 1 % de biocarbón de tarimas no se evidenciaron diferencias significativas para el ensayo de carbonización 1 y el ensayo de carbonización 2 ($P > 0,05$) (Apéndice 8) al igual que los sustratos con concentraciones al 5 % (Apéndice 8), por lo que no se presentó un rechazo, tal como se observa en la Figura 4.7. Mas para el ensayo de carbonización 3 se notó que hubo un rechazo de las lombrices hacia el carbón ($P < 0,05$) (Apéndice 8), tanto para el sustrato con el 1 % de biocarbón como para el que contenía el 5 % (Figura 4.7). En este caso el carbón presentó mayor olor que los demás lo que coincide con el mayor rechazo (Cuadro 4.6).

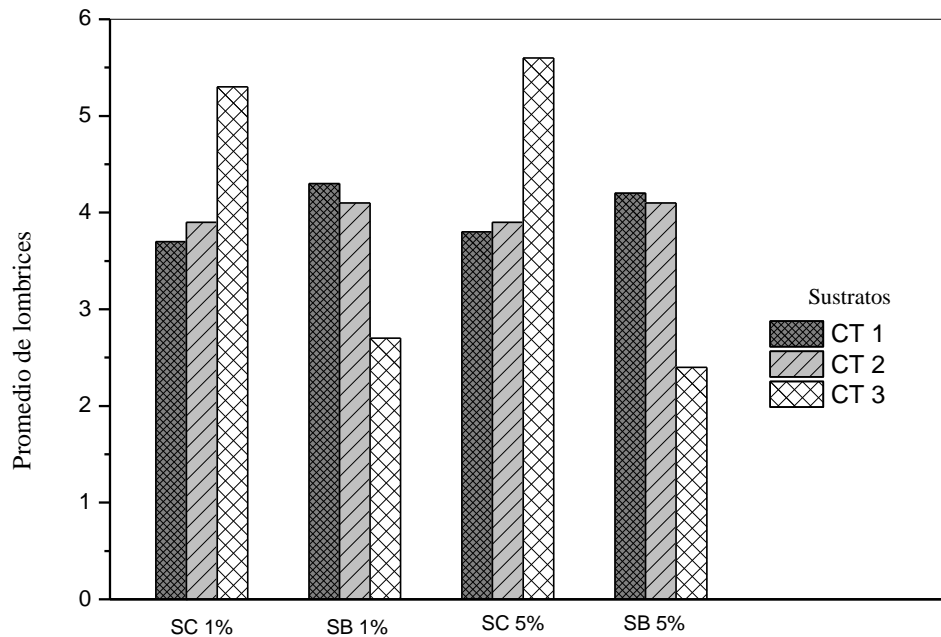


Figura 4.7 Promedio de lombrices contabilizadas en los sustratos con carbón del residuo de tarimas, y en los sustratos control.

En cuanto el SB (sustrato de biocarbón) al 1 % y el SB al 5 %, las lombrices no mostraron rechazo al carbón de los ensayo de carbonización 1 y 2 del residuo de la construcción

($P > 0,05$). Sin embargo, sí rechazaron el SB al 1 % de biocarbón del ensayo de carbonización 3 ($P < 0,05$), tal y como se observa en la Figura 4.8. Este carbón presentó un mayor olor que los otros carbones (cuadro 4.6), sin embargo estos resultados no son concluyentes, ya que no hubo rechazo de este carbón al 5 %.

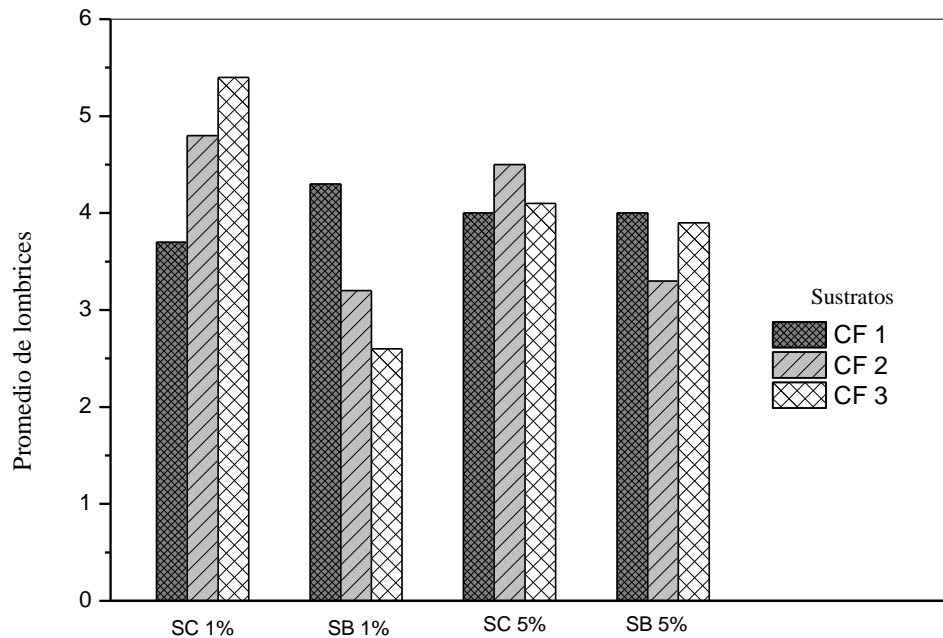


Figura 4.8 Promedio de lombrices contabilizadas en los sustratos con carbón del residuo de la construcción, y en los sustratos control.

Los resultados obtenidos para ambos carbones no son concluyentes, a pesar de que se humedecieron los sustratos antes de evaluarlos y la mayor concentración evaluada fue de 5% de carbón, ya que según encontraron Li et al. (2011) las lombrices evitan concentraciones de 10% o más de carbón seco en el suelo.

4.2 POTENCIAL ANUAL DE LOS RESIDUOS

A través de la valorización de los residuos se pueden generar beneficios económicos, sociales y ambientales.

Como se ha mencionado anteriormente una de las formas en que se pueden valorizar los residuos biomásicos lignocelulósicos es transformándolos en carbón, mediante procesos termoquímicos. El carbón generado puede contener un gran potencial en términos energéticos y en diferentes aplicaciones.

Seguidamente se presenta la estimación del potencial anual de la valorización de los residuos de la fábrica de tarimas, así como el potencial anual al valorizar los residuos de las construcciones de casas de habitación en Costa Rica.

En la empresa Maderas Bosque Verde se generan mensualmente 15 000 kg de residuos de madera que se almacenan en sacos, los cuales son piezas de tamaños reducidos (Apéndice 9), y 63 000 kg de residuos que corresponden a piezas largas que son acomodadas en pacas (Apéndice 9), los cuales en total, al año representan 936 toneladas, esto sin contemplar residuos como el aserrín. Se genera una cantidad significativa de residuos, los cuales normalmente se van acumulando en la empresa, implicando problemas de espacio, y solamente las pacas son vendidas a muy bajo precio. Por tal razón toma relevancia considerar otras medidas para gestionar este material, como por ejemplo su valorización.

En las obras constructivas se generan cantidades importantes de residuos biomásicos lignocelulósicos, los cuales normalmente no se separan en la fuente, y se disponen en conjunto con residuos peligrosos. El segregar este material en la fuente y valorizarlo puede significar beneficios tanto ambientales como económicos.

En el cuadro 4.15 se ofrece una síntesis de la información que queda consignada en el apéndice 9 sobre este tema.

Cuadro 4.15 Información utilizada para estimar el potencial anual de los residuos.

Parámetros	Residuo	
	Tarimas	De la construcción
	10 sacos grandes (1500 kg/sacos-mes)	
Índice de generación	90 pacas (700 kg/paca-mes) (Camacho, G. Comunicación personal. 02 de mayo, 2015)	0,8461 kg/m ² (Abarca, L. 2014)
Índice anual del 2014 Obras habitacionales (casas) (CFIA,2015)	-	1,769,673
Rendimiento del carbonizador (%)	32	29
Consumo de leña (%)	35	33
Poder calórico del carbón (MJ/kg)	29	27
Precio de venta de carbón (CRC/kg)		750

A través de la información citada en el (Cuadro 4.15), se estimó que con la cantidad de residuos generados en Maderas Bosque Verde se podrían producir 195 t de carbón al año equivalentes a 5646 GJ de calor. Igualmente se determinó que el valor comercial es de 146 016 000 colones. Es importante considerar que se debe realizar el análisis financiero completo para asegurar la factibilidad de aprovechar estos residuos, ya que en los cálculos no se están considerando los egresos que se derivan del proceso, como la inversión inicial, el salario de

los operadores, el costo de las operaciones, entre otras, además del periodo de retorno. También es necesario evaluar el impacto ambiental que podrían provocar estas operaciones.

Se estimó que en el país se generaron aproximadamente 1497 toneladas de residuos de madera de la construcción de casas de habitación en el año 2014, con los cuales al valorizarlos se pudo haber producido alrededor de 291 t de carbón que significarían 7855 GJ de calor. El valor de este carbón se estimó en 218 197 000 colones (Cuadro 4.16). Sería necesario hacer el respectivo análisis financiero y el análisis ambiental para determinar la factibilidad de esta actividad.

Cuadro 4.16 Potencial anual del residuo de la empresa Maderas Bosque verde y de los residuos de la construcción

Parámetro	Potencial anual	
	Residuos de tarimas	Residuos de la construcción
Residuos (t)	936	1497
Carbón vegetal (t)	195	291
Valor calórico (GJ)	5646	7855
Ingresos por venta de carbón (CRC)	146 016 000	218 197 000

4.3 COSTO MONETARIO DE DISPONER LOS RESIDUOS EN EL RELLENO SANITARIO.

No considerar la jerarquización de la gestión integral de los residuos (Figura 2.1), puede implicar a las fuentes generadoras altos costos de manejo por disponerlos en el relleno sanitario, por ejemplo en el caso de disponer allí de los residuos lignocelulósicos considerados en este trabajo.

Estos costos de disposición y transporte se estimaron para la empresa Maderas Bosque verde, y para el residuo generado en el sector construcción en el área metropolitana.

Seguidamente se presentan las tarifas de los costos de disposición y los costos de transporte que implicaría el manejo de los residuos de la empresa Maderas Bosque Verde, ubicada en Agua Caliente de Cartago, al relleno sanitario Los Pinos, manejado por la empresa WPP,

así como las tarifas del costo de disposición y transporte de los residuos generados en el sector construcción. Para estimar los costos de transporte se consideraron 2 casos, el primero que la fuente de generación se ubicara a 10 km del RS, y el segundo se realizó asumiendo que la fuente de generación se ubicara a 20 km del RS.

Cuadro 4.17 Tarifas de costo de disposición, transporte de los residuos de tarimas y de los residuos de la construcción a rellenos sanitarios de la empresa WPP

Residuo	Distancia	Costo de transporte	Costos de disposición de residuos (CRC/t)
Tarimas	RS-Empresa Maderas		
	Bosque Verde- RS Los Pinos	55 000	
			17 000
De la construcción	RS-10 km-RS	55 000	
	RS-20 km-RS	75 000	

Fuente: (Sojo, K. Comunicación personal, 20 de junio del 2015)

Para la empresa Maderas Bosque Verde, considerando la cantidad de residuos de tarimas generados al año (936 t), su densidad y el volumen del contenedor que ofrece la empresa WPP para transportar los residuos, se estimó que sería necesario 40 viajes al relleno sanitario para disponer la totalidad de los residuos.

En cuanto al residuo de la construcción, mediante la información de la cantidad de residuos que se generan en las obras constructivas, un promedio de la densidad que estos podrían tener y asumiendo que se cuenta con un contenedor de un volumen de 25 m³, se estimó que se requerirían realizar 180 viajes para transportar todo el material al relleno.

Cuadro 4.18 Cantidad de viajes anuales que se deben realizar para transportar los residuos de la empresa Maderas Bosque Verde al año.

Parámetro	Residuo	
	Tarimas	De la construcción
Generación (kg)	936 000	1 497 000
Densidad de bulto del residuo	1040 ^a	445 ^b
Volumen del contenedor	22,5 ^c	18,75 ^d
Residuos por contenedor	23 400	8344
Viajes	40	180

^a Densidad de *gmelina s.p.* (Moya et al., 2011) ^b Apéndice 10. ^c Corresponde al 90 % del volumen del contenedor. ^d Corresponde a un 75 % del volumen del contenedor

El costo por la disposición y el transporte de los residuos de tarimas al relleno sanitario Los Pinos, sería de 18 112 000 colones, donde el costo del transporte representa un 12 % del costo total.

Mientras el transporte y disposición de los residuos de madera de la construcción de viviendas en nuestro país en rellenos sanitarios, considerando que la fuente se encuentra a 10 km del mismo implicaría un costo aproximado de 35 553 000 colones y con la fuente a 20 km del relleno un costo de 39 153 000 colones. En este caso, los costos de transporte representan un 28% y 34% respectivamente, del costo total de disposición de residuos.

Cuadro 4.19 Costo monetario anual de disponer los residuos en el relleno sanitario.

Residuo	Distancia	Costo transporte (CRC)	Costo disposición (CRC)	Costo Total (CRC) (Disposición y transporte)
	RS-Empresa			
Tarimas	Maderas Bosque Verde- RS Los Pinos	2 200 000	15 912 000	18 112 000
	RS-10 km-RS	9 900 000		35 553 000
De Construcción	RS-20 km-RS	13 500 000	25 653 000	39 153 000

4.4 VALORIZACIÓN VS. DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS

En el cuadro 4.20 se muestran los costos asociados a una eventual disposición final de los residuos en cuestión.

Disponer en el relleno sanitario los residuos generados en la empresa Maderas Bosque Verde le implicaría costos significativos (CRC 18 112 000), que probablemente afectarían el desarrollo de la empresa. Por lo contrario, si Maderas Bosque Verde invirtiera en la

valorización de sus residuos podría tener a cambio ingresos por 146 016 000 colones. Esto debido a la gran generación de este residuo por ser su materia prima.

En el caso del residuo de madera del sector construcción, su disposición en rellenos sanitarios implicaría costos monetarios de 35 000 000 colones a una distancia de 10 km del relleno y de 39 000 000 de colones a 20 km del relleno, pero de valorizarlos podría generar un valor comercial por 218 197 000 colones. Como se ha mencionado anteriormente estos datos se deben reevaluar mediante un análisis financiero.

Cuadro 4.20 Costos de disposición final anual de los residuos y los ingresos que se pueden obtener al valorizarlos.

Residuo	Distancia	Costos total de Disposición y transporte al relleno sanitario (CRC)	Valor comercial del carbón (CRC)
	RS-Empresa		
Tarimas	Maderas Bosque Verde- RS Los Pinos	18 112 000	146 016 000
De la construcción	RS-10 km-RS	35 553 000	218 197 000
	RS-20 km-RS	39 153 000	

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El carbonizador presentó un rendimiento de entre 29% y 32 % (m/m) con respecto a la masa del sustrato, un rendimiento bueno en comparación con otros métodos de carbonización.
- El requerimiento de leña por ensayo de carbonización fue de 33 % a 35 %, pero podría reducirse o eliminarse al usar el calor residual de la fase pirolítica del proceso, por tanto se recomiendan estudios en este sentido.
- El proceso es simple, donde el tiempo del proceso por ensayo de carbonización fue de 5 horas, el cual es un periodo menor comparado con el requerido por los métodos tradicionales de carbonización.
- Los gases pirolíticos no se incineraban completamente, evidenciado en que la fase pirolítica se identificó la salida cuantiosa de humo, aspecto fundamental a corregir.
- Temperaturas mayores a los 600 °C se registraron en la campana del carbonizador, temperatura óptima para obtener un carbón de buena calidad.
- La calidad del carbón derivado de ambos residuos fue buena de acuerdo a la mayoría de pruebas realizadas, donde se resalta su poder calórico, 29 MJ/kg para el carbón del residuo de tarimas y 27 MJ/kg para el carbón del residuo de la construcción.
- El carbón del residuo de construcción tuvo un alto contenido de cenizas, lo cual podría ser una de las causas de que posea un poder calórico menor al de carbón de tarimas.
- No hubo inhibición de la germinación de las semillas de rábano, en los diferentes sustratos de tierra-carbón evaluados, sin embargo esta prueba permitió observar mayor resistencia de las plántulas a la escasez de agua cuando hubo carbón presente en el sustrato.
- Las pruebas en cuanto al rechazo de lombrices para los carbones de ambos residuos no fueron concluyentes.

- Los carbones de los residuos biomásicos de la producción de tarimas y de la construcción tienen un potencial alto como fuente de energía, y un considerable valor comercial.
- Se estimó que los costos de disposición de los residuos en rellenos sanitarios podrían ser de 18 millones de colones para Maderas Bosque Verde y para el sector construcción de 35 a 39 millones de colones aproximadamente, en contraste con el valor comercial de los carbones de 146 millones de colones y 218 millones de colones respectivamente. Esto justifica un análisis más específico de la factibilidad de la valorización de los dos residuos
- Se recomienda hacer mejoras en el diseño del reactor, enfocadas en el aprovechamiento del calor residual, la combustión completa de los gases, el mantenimiento del reactor, y el empacado de la biomasa.

6 REFERENCIAS

- Abarca, L. (2014). *A Construction Waste Generation Model for Developing Countries*. (Tesis inédita de doctorado). The Eindhoven University of Technology. Alemania.
- Adam, J. C. (2009). Improved and more environmentally friendly charcoal production system using a low-cost retort-kiln (Eco-charcoal). *Renewable Energy*, 34(8), 1923–1925. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.009>
- Antal, M. J. & Grønli, M. (2003). The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42, 1619–1640. <http://doi.org/10.1021/ie0207919>
- Basu, P. (2010). Biomass Characteristics. In *Biomass Gasification and Pyrolysis* (pp. 27–63). <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-374988-8.00002-7>
- Benedicto, L. G., Martín, F. M., López, C. F., Ingeniería, D. D. E., Montes, F. E. T. S. I. D. E., & Universitaria, C. (1997). *Biocombustibles sólidos y líquidos forestales*. Madrid. Retrieved from <http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos/article/viewFile/4469/4398>
- Biomass Users Network (BUN-CA). (2002). *Manuales sobre energía renovable. Biomasa. Costa Rica*. Retrieved from <http://www.bionica.info/biblioteca/BUNCA2002Biomasa.pdf>
- Brownsort, P. (2009a). *Biomass pyrolysis processes: performance parameters and their influence on biochar system benefits*. (Tesis inédita de Máster en Ciencias). University of Edinburgh.
- Brownsort, P. a. (2009b). Biomass pyrolysis processes: performance parameters and their influence on biochar system benefits. *The University of Edinburgh*, 89. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1842/3116>
- Byrne, C., & Nagle, D. (1997). Carbonization of wood for advanced materials applications., 35(2), 259–266.
- Carazo, E., Ramírez, F., Roldán, C., & Villegas, G. (2007). *Encuesta de Oferta y Consumo Energético Nacional a partir de la Biomasa en Costa Rica. 2006*. Carazo, E., Ramírez, F., Roldán, C., & Villegas, G. (2007). *Encuesta de Oferta y Consumo Energético Nacional a partir de la Biomasa en Costa Rica. 2006*. San José. .
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA). (2014). *Indicadores CFIA de la Construcción Costa Rica En metros cuadrados Comportamiento del periodo : Enero – diciembre 2013-2014*. Informe Anual 2014. Retrieved from <http://www.cfia.or.cr/estadisticas.htm>

- Córdoba, R. (2005). Conceptos básicos sobre el secado de la madera. *Revista Forestal, Costa Rica*, 2(5), 1–5. Retrieved from http://www.tec.ac.cr/sitios/Docencia/forestal/Revista_Kuru/anteriores/anterior5/pdf/Solucion 1.pdf
- Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11), 1357–1378. [http://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00137-0](http://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0)
- Demirbas, A., & Arin, G. (2002). An Overview of Biomass Pyrolysis. *Energy Sources*. <http://doi.org/10.1080/00908310252889979>
- Díaz, P. (2005). *Evaluación de Propiedades Físicas y Mecánicas de madera de*. (Tesis de Grado) Universidad de Talca. Retrieved from http://dspace.utalca.cl/retrieve/6282/diaz_mendez.pdf
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (1983). *Métodos simples para fabricar carbón vegetal*. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/x5328s/X5328S00.htm>
- Gómez, M. (2008). *Sistema de generación eléctrica con pila de combustible de óxido sólido alimentado con residuos forestales y su optimización mediante algoritmos basados en nubes de partículas*. (Tesis doctoral). Retrieved from Disponible en la base de datos: http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/tesisuned:IngInd-Mgomez/TESIS_MGG1_Capitulo1.pdf
- Hernández, R. (2011). *Estudio técnico para la obtención de briquetas de fácil encendido a partir de carbón de la cascarilla de palma africana y su producción en la empresa TYSAI. S.A. Ecuador*. (Tesis de grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. Retrieved from <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/1484/1/85T00206.pdf>
- IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático). (2007). IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Retrieved from https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-2-5.html
- Laird, D. A., Brown, R. C., Amonette, J. E., & Lehmann, J. (2009). Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. <http://doi.org/10.1002/bbb.169>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). *Biochar for Environmental Management. Science And Technology* (Vol. 1). <http://doi.org/10.4324/9781849770552>
- Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. Mitigation and adaptation strategies for global change., 11(395-

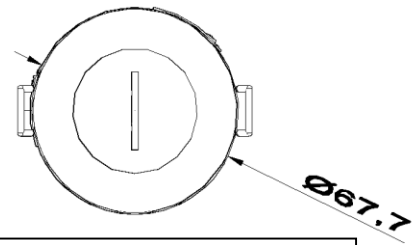
- 419.). Retrieved from <http://link.springer.com/article/10.1007/s11027-005-9006-5#page-1>
- Li, D., Hockaday, W. C., Masiello, C. A., & Alvarez, P. J. J. (2011). Earthworm avoidance of biochar can be mitigated by wetting. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(8), 1732–1737. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.019>
- López, D. (2013). *Valorización de biomasa de origen vegetal mediante procesos térmicos y termoquímicos*. Universidad de Castilla-La Mancha. Retrieved from [https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/3393/TESIS López González.pdf?sequence=1](https://ruidera.uclm.es/xmlui/bitstream/handle/10578/3393/TESIS_López_González.pdf?sequence=1)
- Ministerio de salud. Política Nacional Para la Gestión Integral de Residuos 2010-2021 (2011). Costa Rica. Retrieved from http://www.bvs.sa.cr/ambiente/politica_salud_2011.pdf
- Moya, R., Muñoz Acosta, F., Salas Garita, C., Berrocal, A., Leandro, L., & Esquivel, E. (2011). *Tecnología de madera de plantaciones forestales: Fichas técnicas (en línea)*. Cartago, CR. Retrieved from [http://www.tec.ac.cr/sitios/Docencia/forestal/kuru/Documents/2010/Kuru marzo 2010/Fichastecnicas - marzo 2010.pdf](http://www.tec.ac.cr/sitios/Docencia/forestal/kuru/Documents/2010/Kuru_marzo_2010/Fichastecnicas_-_marzo_2010.pdf)
- Moya, R., & Serrano, R. (2011). Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico., 8(21), 1–12.
- Pacheco, G. & C., & R. (2001). *Evaluación del proceso de carbonización y calidad del carbón de Acacia caven (Mol.) Mol. Producido en hornos de barro*. Retrieved from http://bosques.ciren.cl:8080/bitstream/handle/123456789/106/UCHILE_15.pdf?sequence=1
- Pacheco, G., & Carmona, R. (2005). *Evaluación del proceso de carbonización y la calidad del carbón de Acacia caven (Mol.) Mol. producido en hornos de barro*.
- Park, H. M. (2009). *Comparing Group Means : T-tests and One-way ANOVA*. Indiana University. Retrieved from <http://rt.uits.iu.edu/visualization/analytics/docs/hlm-docs/ttest.pdf>
- Programa de Competitividad y Ambiente (CYMA). (2007). Plan de Residuos Sólidos. Diagnóstico de Residuos Sólidos Costa Rica.
- República de Costa Rica. Reglamento Rellenos Sanitarios, Pub. L. No. Decreto Ejecutivo N° 27378- S (1997). Costa Rica: Gaceta del 19 de junio del 1997.
- República de Costa Rica. Ley para la Gestión Integral de Residuos No.8839 (2010). Costa Rica: Gaceta N° 135 del 13 de julio del 2010.

- Roa, F., & Quesada, J. (2011). “ *Evaluación de la pirólisis de algunos residuos agroindustriales problemáticos y plásticos* .” Retrieved from <http://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5777/evaluación-pirólisis-desechos-agroindustriales.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sanabria, E. Cayré, M . y Frank, W. (2007). Optimización de producción de carbón con *Aspidosperma quebracho blanco* en la provincia del Chaco, Argentina. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 23–27. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62913103>
- Saval, S. (2012). Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales : Pasado , Presente y Futuro. *BioTecnología*, 16, 14–46.
- Soto, S. (2006). *Duodécimo Informe del Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible*.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos*. McGraw-Hill.
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales (UICN). (2011). *Guía de manejo de escombros y otros residuos de la construcción*. Retrieved from http://cmsdata.iucn.org/downloads/guia_escombros_baja.pdf
- United States Department of Agriculture. (2009). New Leads on Nitrous Oxide. *Agricultural Research Magazine*, 8–9. Retrieved from <http://agresearchmag.ars.usda.gov/AR/archive/2009/Nov/nitrous1109.pdf>
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K. Y., Downie, A., Rust, J., ... Cowie, A. (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 327, 235–246. <http://doi.org/10.1007/s11104-009-0050-x>

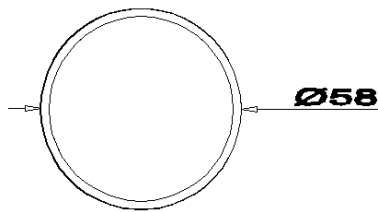
7 APÉNDICES

7.1 APÉNDICE 1. DIMENSIONES DEL CARBONIZADOR.

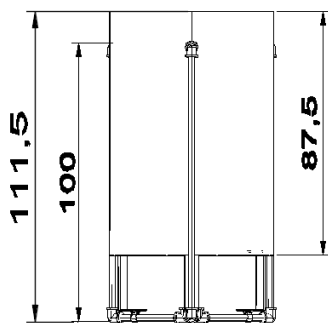
Escala 1:1
Unidades: cm



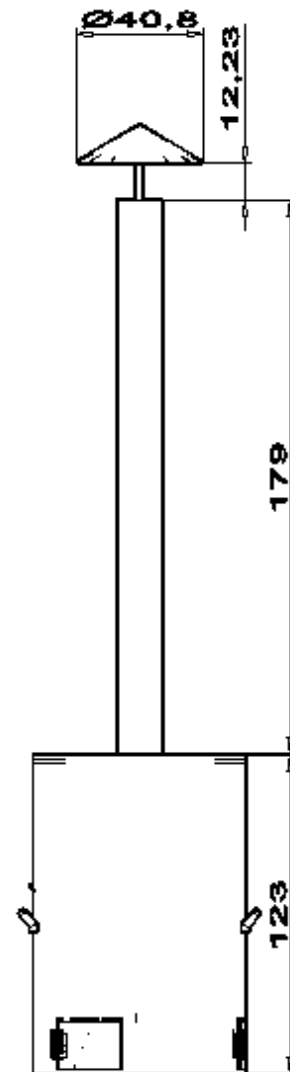
VISTA SUPERIOR DEL CARBONIZADOR



VISTA SUPERIOR DE LA TAPA



VISTA LATERAL DEL BARRIL MODIFICADO



VISTA LATERAL DEL CARBONIZADOR

7.2 APÉNDICE 2: MUESTREO DEL CARBÓN.

7.2.1.1 Muestreo del carbón de tarimas

Para caracterizar el carbón de tarimas se tomaron 2 muestras de 2 diferentes ubicaciones del carbón en el saco (arriba y en medio), también se seleccionaron al azar 2 muestras de carbón de corteza. Con estas muestras se determinó tanto la densidad “real” del carbón, el contenido de humedad, contenido de volátiles, contenido de cenizas y el poder calórico. Las muestras para evaluar la densidad de bulto se tomaron al azar de cada saco, hasta llenar el recipiente elegido para dicha medición.

Los trozos de carbón del residuo de tarimas tomados para determinar el contenido de humedad, el contenido de volátiles y el contenido de cenizas, se molieron mediante un mortero y se tamizaron, tal como se establece en la preparación de las muestras de la norma ASTM D1762-84.

7.2.1.2 Muestreo del carbón del residuo de la construcción.

Para la medición de la densidad de bulto se tomaron piezas al azar, tomando las suficientes para llenar el recipiente utilizado con este fin. Igualmente la determinación de la densidad “real” del carbón se realizó tomando los trazos al azar, solo que en este caso se tomaron únicamente 10 trozos.

Con el fin de determinar los otros parámetros del carbón, inicialmente se procedió a moler el carbón de cada ensayo de carbonización, mediante un molino, después se almacenó en una bolsa, se cerró y se mezcló para homogenizar el material. Esto debido a la heterogeneidad de la materia prima de este carbón, en cuanto a las especies de la madera, como se explica en la sección de resultados. De cada ensayo de carbonización se tomaron 10 muestras, para obtener resultados lo más confiables posibles. La toma de las muestras se realizó mediante el muestreo sistemático (Zhang, 2007) para asegurar muestras representativas del carbón (el cual se detalla seguidamente). Finalmente las muestras fueron molidas y tamizadas al igual que las muestras del carbón de tarimas, según la norma ASTM D1762-84.

7.2.1.2.1 Muestreo sistemático

Este muestreo se realizó colocando el carbón en una manta y se distribuyó formando un área de 2 metros de largo por 1,50 metro de ancho, seguidamente se dividió en 16 subáreas de 50 cm de largo por 37,5 cm de ancho, las cuales se enumeraron del 1 al 16, y al azar se sortearon las 10 muestras a tomar.

De cada sección seleccionada se tomó mediante un beaker una muestra de carbón aproximada de 10 gramos y se colocó en una bolsa con cierre. Esta muestra se utilizó para determinar el contenido de volátiles, contenido de humedad, contenido de cenizas, y el poder calórico, para lo cual se pasó por un tamiz No.20 (850 μ m) marca ASTM, según la norma ASTM D1762-84 (Reaprobada en el 2013)

Al mismo tiempo, se realizó un muestreo compuesto para el análisis del carbón como mejorador de suelos, para lo que se tomó una muestra de 30 gramos de cada subárea favorecida, y se colocaron en una sola bolsa hermética. Finalmente las muestras se pasaron por un tamiz No.6 marca ASTM y se volvió a almacenar en la bolsa.

7.3 APÉNDICE 3: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CARBÓN.



Figura A . 7.3.1 a) Probetas de carbón. b) Ensayo de compresión

7.4 APÉNDICE 4. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE RECHAZO CON LOMBRICES.

En este subapartado se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de rechazo con lombrices para cada uno de los sustratos preparados con cada uno de los carbones de ambos residuos.

Prueba de rechazo con lombrices en sustratos con carbón del residuo de tarimas.

Cuadro A. 7.4.1 Cantidad de lombrices presentes en los sustratos control (SC) y los sustratos tierra-biocarbón (SB) de tarimas a diferentes concentraciones, del ensayo de carbonización 1.

Cantidad de lombrices por sustrato			
SC	SB al 1 %	SC	SB al 5 %
3	5	4.5	3.5
2.5	5.5	2.5	4.5
4	4	4.5	3.5
5	3	4.5	3.5
4	4	3	5
$4.3^a \pm 0.97^b$	$3.7^a \pm 0.97^b$	$4^a \pm 0.97^b$	$3.8^a \pm 0.71^b$

^a valor promedio. ^b desviación estándar. (Fuente: Pérez (2015)).

Cuadro A.7.4.2 Cantidad de lombrices presentes en los sustratos control (SC) y los sustratos tierra-biocarbón (SB) de tarimas a diferentes concentraciones, del ensayo de la carbonización 2.

Cantidad de lombrices por sustrato			
SC	SB al 1 %	SC	SB al 5 %
7	2	4.5	3.5
2	5	4	4
3	5	2.5	5.5
3	5	4	4
4.5	3.5	4.5	3.5
$4.8^a \pm 1.48^b$	$3.2^a \pm 1.48^b$	3.9 ± 0.82^b	4.1 ± 0.82^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar. (Fuente: Pérez (2015)).

Cuadro A. 7.4.3 Cantidad de lombrices presentes en los sustratos control (SC) y los sustratos tierra-biocarbón (SB) de tarimas a diferentes concentraciones, del ensayo de carbonización 3.

Cantidad de lombrices por sustrato			
SC	SB al 1 %	SC	SB al 5 %
6	2	6	2
4.5	3.5	5.5	2.5
6	2	6	2
5	3	6	2
5	3	4.5	3.5
$5.3^a \pm 0.67^b$	$2.7^a \pm 0.67^b$	$5.6^a \pm 0.65^b$	$2.4^a \pm 0.65^b$

^a valor promedio. ^b desviación estándar. (Fuente: Pérez (2015)).

Prueba de rechazo con lombrices en sustratos con carbón del residuo de la construcción.

Cuadro A. 7.4.4 Cantidad de lombrices presentes en los sustratos control (SC) y los sustratos tierra-biocarbón (SB) del residuo maderable de la construcción a diferentes concentraciones, del ensayo de carbonización 1.

Cantidad de lombrices por sustrato			
SC	SB al 1 %	SC	SB al 5 %
3	5	5	3
7	1	4	4
2	6	3	5
3.5	4.5	5	3
3	5	3	5
$4.3^a \pm 1.92^b$	$3.7^a \pm 1.92^b$	$4^a \pm 1^b$	$4^a \pm 1^b$

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

Cuadro A.7.4.5. Cantidad de lombrices presentes en los sustratos control (SC) y los sustratos tierra-biocarbón (SB) del residuo maderable de la construcción a diferentes concentraciones, del ensayo de carbonización 2.

Cantidad de lombrices por sustrato			
SC	SB al 1 %	SC	SB al 5 %
7	1	4	
5	3	3.5	4.5
3	5	4	4
4	4	6	2
5	3	5	3
$4.8^a \pm 1.48^b$	$3.2^a \pm 1.48^b$	$4.5^a \pm 1^b$	$3.3^a \pm 0.97^b$

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

Cuadro A.7.4.6 Cantidad de lombrices presentes en los sustratos control (SC) y los sustratos tierra-biocarbón (SB) del residuo maderable de la construcción a diferentes concentraciones, del ensayo de carbonización 3.

Cantidad de lombrices por sustrato			
SC	SB al 1 %	SC	SB al 5 %
6	2	2	6
5	3	4	4
6	2	2	6
5	3	4.5	3.5
5	3	8	0
$5.4^a \pm 0.55^b$	$2.6^a \pm 0.55^b$	$4.1^a \pm 2.46^b$	$3.9^a \pm 2.46^b$

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

7.5 APÉNDICE 5: RESULTADOS DE LA PRUEBA DE GERMINACIÓN EN SUSTRATOS DE TIERRA-CARBÓN Y SUSTRATOS CONTROL

A continuación se presentan los resultados de germinación obtenidos al evaluar diferentes sustratos con y sin biocarbón, derivados de los residuos de tarimas y de los residuos maderables de la construcción.

Germinación en sustratos con carbón de tarimas

Cuadro A. 7.5.1 Germinación de semillas de rábano, en sustrato de tierra sin carbón (Control)

SC	
Semillas germinadas	%G
19	95
16	80
20	100
16	80
20	100

Cuadro A. 7.5.2 Germinación de semillas de rábano, en sustratos de tierra con diferentes concentraciones de carbón de formaleta correspondiente al ensayo de carbonización 1

SB al 1 %		SB al 5 %		SB al 10 %	
Semillas germinadas	%G	Semillas germinadas	%G	Semillas germinadas	% G
20	100	19	95	20	100
20	100	19	95	18	90
20	100	20	100	20	100
20	100	18	90	19	95
20	100	19	95	20	100

Cuadro A. 7.5.3 Germinación de semillas de rábano, en sustratos de tierra con diferentes concentraciones de carbón de formaleta correspondiente al ensayo de carbonización #2

SB al 1 %		SB al 5 %		SB al 10 %	
Semillas germinadas	%G	Semillas germinadas	%G	Semillas germinadas	% G
20	100	19	95	20	100
20	100	19	95	20	100
17	85	20	100	20	100
20	100	20	100	20	100
18	90	20	100	20	100

Cuadro A. 7.5.4 Germinación de semillas de rábano, en sustratos de tierra con diferentes concentraciones de carbón de formaleta correspondiente al ensayo de carbonización 3

SB al 1 %		SB al 5 %		SB al 10 %	
Semillas germinadas	%G	Semillas germinadas	%G	Semillas germinadas	% G
20	100	20	100	20	100
20	100	20	100	20	100
20	100	20	100	20	100
18	90	20	100	20	100
20	100	20	100	20	100

Germinación en sustratos con carbón del residuo de construcción.

Cuadro A. 7.5.5 Germinación de semillas de rábano, en sustrato de tierra sin carbón (SC).

SC	
Semillas germinadas	%G
20	100
20	100
19	95
20	100
20	100

Cuadro A. 7.5.6 Germinación de semillas de rábano, en sustratos de tierra con diferentes concentraciones de carbón de formaleta correspondiente al ensayo de carbonización 1

SB al 1 %		SB al 5 %		SB al 10 %	
Semillas germinadas	%G	Semillas germinadas	%G	Semillas germinadas	% G
18	90	19	95	18	90
20	100	18	90	19	95
20	100	19	95	19	95
20	100	20	100	20	100
19	95	19	95	20	100

Cuadro A. 7.5.7 Germinación de semillas de rábano en sustratos de tierra con diferentes concentraciones de carbón de formaleta correspondiente al ensayo de carbonización 2.

SB al 1 %		SB al 5 %		SB al 10 %	
Semillas germinadas	%G	Semillas germinadas	%G	Semillas germinadas	% G
19	95	20	100	20	100
19	95	19	95	20	100
20	100	20	100	20	100
20	100	20	100	20	100
29	95	19	95	20	100

Cuadro A. 7.5.8 Germinación de semillas de rábano en sustratos de tierra con diferentes concentraciones de carbón de formaleta correspondiente al ensayo de carbonización 3.

SB al 1 %		SB al 5 %		SB al 10 %	
Semillas germinadas	%G	Semillas germinadas	%G	Semillas germinadas	% G
20	100	20	100	14	70
19	95	18	90	20	100
18	90	20	100	16	80
19	95	18	90	20	100
19	95	20	100	17	85

7.6 APÉNDICE 6. RESULTADOS DE ANOVA DE UN FACTOR, Y DE LA PRUEBA DE TUKEY PARA LA COMPARACIÓN DE MEDIAS DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS A LOS RESIDUOS BIOMÁSICOS.

Contenido de humedad (H)

Cuadro A. 7.6.1 Contenido de humedad del residuo biomásico de tarimas y del residuo de la construcción

Parámetro	Residuo	Ensayo de carbonización			
		1	2	3	Media
Contenido de humedad (%)	Tarimas	15,46 ^a ±3,03 ^b	17,69 ^a ±7,45 ^b	14,08 ^a ±0,65 ^b	15,74 ^a ±3,71 ^b
	De la construcción				11,02 ^a ±0,86 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

Cuadro A. 7.6.2 Resultados de ANOVA para % H RT1; % H RT2; % H RT3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	53,21	26,60	1,23	0,314
Error	21	455,64	21,70		
Total	23	508,85			

Cuadro A. 7.6.3 Resultados de ANOVA para % H RT, % HRF.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	55.76	55.759	52.61	0.000
Error	16	16.96	1.060		
Total	17	72.72			

Cuadro A. 7.6.4 Resultados de la prueba de Tukey para % H RT, % HRF.

Factor	N	Mean	Grouping
% H RT	3	15.74	A
% H RF	15	11.021	B

Poder calórico (PC)

Cuadro A. 7.6.5 Poder calórico del residuo biomásico de tarimas y del residuo de la construcción

Parámetro	Residuo	Ensayo de Carbonización			
		1	2	3	Media
Contenido de humedad (%)	Tarimas	17,63 ^a ± 2,00 ^b	17,53 ^a ± 1,63 ^b	17,72 ^a ± 1,19 ^b	17,63 ^a ± 1,61 ^b
	De la construcción	17,95 ^a ± 1,52 ^b			

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

Cuadro A. 7.6.6 Resultados de ANOVA para PC RT1; PC RT2; PC RT3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	0,1351	0,06753	0,03	0,975
Error	21	565,884	269,469		
Total	23	567,235			

Cuadro A. 7.6.7 Resultados de ANOVA para PC RT, PC RF

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	1.336	1.336	0.56	0.456
Error	52	123.420	2.373		
Total	53	124.756			

7.7 APÉNDICE 7: RESULTADOS DE ANOVA DE UN FACTOR, Y DE LA PRUEBA DE TUKEY PARA LA COMPARACIÓN DE MEDIAS DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS DEL RENDIMIENTO Y EL CONSUMO DE LEÑA

Rendimiento del carbonizador

Cuadro A. 7.7.1 Rendimiento de producción del carbón del residuo de tarimas y del residuo de la construcción

Parámetro	Residuo	Ensayo de carbonización			
		1	2	3	Media
Porcentaje de rendimiento (%)	Tarimas	33	30	32	32,0 ± 1,3
	Del residuo de la construcción	28	30	28,6	29 ± 1

Cuadro A. 7.7.2 Resultados de ANOVA para % RT; %RF.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	121.5	121.50	1.96	0.234
Error	4	247.3	61.83		
Total	5	368.8			

Consumo de leña

Cuadro A. 7.7.3 Consumo de leña en cada carbonización, con respecto a la carga del barril

Parámetro	Residuo	Ensayo de Carbonización			Media
		1	2	3	
Consumo de leña (%)	Tarimas	38	33	35	35 ^a ± 2 ^b
	Del residuo de la construcción	23	34	42	33 ^a ± 8 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

Cuadro A. 7.7.4 Resultados de ANOVA para % Leña T; % Leña F.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	2.667	2.667	0.04	0.848
Error	4	254.667	63.667		
Total	5	257.333			

7.8 APÉNDICE 8. RESULTADOS DE ANOVA DE UN FACTOR, Y DE LA PRUEBA DE TUKEY PARA LA COMPARACIÓN DE MEDIAS DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS AL CARBON DE TARIMAS Y EL CARBON DEL RESIDUO DE LA CONSTRUCCIÓN.

Densidad del carbón (DC)

Cuadro A. 7.8.1 Densidad del carbón de tarimas y del residuo de la construcción

Parámetro	Carbón	Ensayo de Carbonización			
		1	2	3	Media
Densidad	Tarimas	0,28 ^a ±0,08 ^b	0,28 ^a ± 0,05 ^b	0,25 ^a ±0,04 ^b	0,27 ^a ± 0,06 ^b
($\frac{g}{cm^3}$)	De la construcción	0,28 ^a ±0,08 ^b	0,28 ^a ±0,05 ^b	0,21 ^a ±0,05 ^b	0,24 ^a ±0,06 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

Cuadro A. 7.8.2 Resultados ANOVA para DC CT1; DC CT2; DC CT3.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	0.006585	0.003293	1.62	0.219
Error	24	0.048822	0.002034		
Total	26	0.055407			

Cuadro A. 7.8.3 Resultados de ANOVA para DC CF1; DC CF2; DC CF3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	0,02595	0,012973	3,60	0,041
Error	27	0,09720	0,003600		
Total	29	0,12315			

Cuadro A. 7.8.4 Resultados de la prueba de Tukey para DC CF1; DC CF2; DC CF3

Factor	N	Mean	Grouping
DR F1	10	0,2820	A
DR F2	10	0,2440	A B
DR F3	10	0,2100	B

Cuadro A. 7.8.5 Resultados de ANOVA DC CT; DC CF

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	0.009993	0.009993	3.08	0.085
Error	55	0.178554	0.003246		
Total	56	0.188547			

Densidad de bulto (DB)

Cuadro A. 7.8.6 Densidad de bulto del carbón de tarimas y del residuo de la construcción

Parámetro	Residuo	Ensayo de carbonización			
		1	2	3	Media
Densidad de bulto ($\frac{g}{cm^3}$)	Tarimas	0,17 ^a ± 0,01 ^b	0,17 ^a ± 0,01 ^b	0,150 ^a ± 0,00 ^b	0,16 ^a ± 0,01 ^b
	De la construcción	0,20 ^a ± 0,01 ^b	0,20 ^a ± 0,01 ^b	0,18 ^a ± 0,02 ^b	0,19 ^a ± 0,01 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

Cuadro A. 7.8.7 Resultados de ANOVA para DB CT1; DB CT2; DB CT3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	0,000562	0,000281	3,43	0,102
Error	6	0,000492	0,000082		
Total	8	0,001054			

Cuadro A. 7.8.8 Resultados ANOVA para DB F1, DB F2, DB F3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	0.001452	0.000726	2.42	0.123
Error	15	0.004496	0.000300		
Total	17	0.005948			

Cuadro A. 7.8.9 Resultados de ANOVA para DB CT; DB CF

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	0.006213	0.006213	23.67	0.000
Error	31	0.008136	0.000262		
Total	32	0.014349			

Cuadro A. 7.8.10 Resultados de la prueba de Tukey para DB CT; DB CF

Factor	N	Mean	Grouping
DA CF	24	0.19222	A
DA CT	9	0.16141	B

Contenido de humedad (H)

Cuadro A. 7.8.11 Contenido de humedad del carbón de tarimas y del residuo de la construcción según ensayo de carbonización

Parámetro	Carbón	Ensayo de Carbonización			
		1	2	3	Media
Contenido de humedad (%)	Tarimas	5 ^a ± 0 ^b	7 ^a ± 1 ^b	5 ^a ± 1 ^b	6 ^a ± 1 ^b
	Corteza de tarimas	7 ^a ± 1 ^b	8 ^a ± 0 ^b	7 ^a ± 1 ^b	7 ^a ± 1 ^b
	De la construcción	6 ^a ± 0 ^b	5 ^a ± 0 ^b	4 ^a ± 0 ^b	5 ^a ± 0 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

Cuadro A. 7.8.12 Resultados de ANOVA para % H CT1; % H CT2; % H CT3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	10,128	50,642	7,15	0,014
Error	9	6,377	0,7085	-	-
Total	11	16,505	-	-	-

Cuadro A. 7.8.13 Resultados de la prueba Tukey para % H CT1; % H CT2; % H CT3

Factor	N	Mean	Grouping
% H CT2	4	7,067	A
% H CT3	4	5,337	B
% H CT1	4	4,957	B

Cuadro A. 7.8.14 Resultados de ANOVA para %H CZT1; %H CZT2; %H CZT3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	1,691	0,8455	2,06	0,273
Error	3	1,229	0,4096		
Total	5	2,920			

Cuadro A. 7.8.15 Resultados ANOVA para % H CT, % HCZ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	8.320	8.320	6.85	0.019
Error	16	19.425	1.214		
Total	17	27.745			

Cuadro A. 7.8.16 Resultados prueba Tukey para % H CT, %HCZ

Factor	N	Mean	Grouping
%H CZ	6	7.229	A
%H CT	12	5.787	B

Cuadro A. 7.8.17 Resultados de ANOVA para % H CF1; % H CF2; % H CF3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	14,499	724,941	166,46	0,000
Error	27	1,176	0,04355	-	-
Total	29	15,675	-	-	-

Cuadro A. 7.8.18 Resultados de la prueba Tukey para % H CF1; % H CF2; % H CF3

Factor	N	Mean	Grouping
% H CF1	10	5,9726	A
% H CF2	10	4,9497	B
% H CF3	10	4,2821	C

Cuadro A. 7.8.19 Resultados de ANOVA para % H CT; %H CF

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	1.345	1.3447	1.53	0.224
Error	40	35.263	0.8816		
Total	41	36.608			

Resistencia a la compresión (RC)

Cuadro A. 7.8.20 Resistencia a la compresión del carbón del residuo de tarimas y de residuo de la construcción

Parámetro	Carbón	Ensayo de Carbonización			
		1	2	3	Media
Compresión ($\frac{kg}{cm^2}$)	Tarimas	101 ^a ± 18 ^b	76 ^a ± 28 ^b	69 ^a ± 23 ^b	82 ^a ± 23 ^b
	De la construcción	78 ^a ± 65 ^b	63 ^a ± 20 ^b	78 ^a ± 78 ^b	73 ^a ± 18 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

Cuadro A. 7.8.21 Resultado de la prueba ANOVA para RC CT

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	5723	2861.3	5.23	0.012
Error	27	14783	547.5		
Total	29	20505			

Cuadro A. 7.8.22 Resultado de la prueba Tukey para RC CT

Factor	N	Mean	Grouping
RC CT 1	10	101.15	A
RC CT 2	10	75.59	A B
RC CT3	10	69.18	B

Cuadro A. 7.8.23 Resultado de la prueba ANOVA para RC CF

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	1459	729.7	0.21	0.815
Error	27	95610	3541.1		
Total	29	97069			

Cuadro A. 7.8.24 Resultado de la prueba ANOVA para RC CT y RC CF

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	5	8487	1697	0.83	0.534
Error	54	110393	2044		
Total	59	118880			

Contenido de volátiles

Cuadro A. 7.8.25 Contenido de volátiles del carbón de tarimas y del residuo de la construcción según ensayo de carbonización

Parámetro	Carbón	Ensayo de carbonización			
		1	2	3	Media
Contenido de volátiles (%)	Tarimas	30 ^a ± 2 ^b	21 ^a ± 8 ^b	21 ^a ± 9 ^b	24 ^a ± 6 ^b
	Corteza de tarimas	24 ^a ± 5 ^b	15 ^a ± 9 ^b	22 ^a ± 13 ^b	20 ^a ± 9 ^b
	De la construcción	12 ^a ± 1 ^b	19 ^a ± 1 ^b	19 ^a ± 1 ^b	17 ^a ± 1 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

Cuadro A. 7.8.26 Resultados de ANOVA para % CV CT1; % CV CT2; % CV CT3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	188,2	94,10	1,90	0,205
Error	9	445,6	49,52		
Total	11	633,9			

Cuadro A. 7.8.27 Resultados de ANOVA para %CV CZT1; %CV CZT2; %CV CZT3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	83,15	41,58	0,45	0,674
Error	3	276,89	92,30		
Total	5	360,05			

Cuadro A. 7.8.28 Resultados de ANOVA para % CV CF1; % CV CF2; % CV CF3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	318,94	159,469	410,95	0,000
Error	27	10,48	0,388		
Total	29	329,42			

Cuadro A. 7.8.29 Resultados de la prueba de Tukey para % CV CF1; % CV CF2; % CV CF3

Factor	N	Mean	Grouping
% CV CF3	10	19,037	A
% CV CF2	10	18,937	A
% CV CF1	10	12,071	B

Cuadro A. 7.8.30 Resultados de ANOVA para % CV CT; % CV CF

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	458.8	458.81	19.05	0.000
Error	40	963.3	24.08		
Total	41	1422.1			

Cuadro A. 7.8.31 Resultados de la prueba Tukey para % CV CT1; % CV CT2; % CV CT3; % CV CF1; % CV CF2; % CV CF3

Factor	N	Mean	Grouping
CV CT	12	24.00	A
CV CF	30	16.682	B

Contenido de cenizas

Cuadro A. 7.8.32 Contenido de cenizas del carbón del residuo de tarimas y del residuo de la construcción.

Parámetro	Carbón	Ensayo de carbonización			
		1	2	3	Media
Contenido de cenizas (%)	Tarimas	2,2 ^a ± 0,4 ^b	3 ^a ± 1 ^b	5 ^a ± 2 ^b	3 ^a ± 1 ^b
	Corteza de tarimas	9 ^a ± 3 ^b	7 ^a ± 1 ^b	12 ^a ± 6 ^b	10 ^a ± 3 ^b
	De la construcción	9 ^a ± 1 ^b	11 ^a ± 2 ^b	13 ^a ± 2 ^b	11 ^a ± 2 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

Cuadro A. 7.8.33 Resultados de ANOVA para % CC CT1; % CC CT2; % CC CT3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	12,82	6,411	3,30	0,084
Error	9	17,47	1,941		
Total	11	30,29			

Cuadro A. 7.8.34 Resultados de ANOVA para % CC CZT1; % CC CZT2; % CC CZT3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	23,18	11,59	0,86	0,508
Error	3	40,66	13,55		
Total	5	63,84			

Cuadro A. 7.8.35 Resultados de ANOVA para % CC CF1; % CC CF2; % CC CF3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	62,11	31,055	8,99	0,001
Error	27	93,26	3,454		
Total	29	155,37			

Cuadro A. 7.8.36 Resultados de la prueba Tukey para % CC CF1; % CC CF2; % CC CF3

Factor	N	Mean	Grouping
% CC CF3	10	12,709	A
% CC CF2	10	10,829	A B
% CC CF1	10	9,187	B

Cuadro A. 7.8.37 Resultados de ANOVA para % CC CT, % CC CF

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	507.9	507.912	109.43	0.000
Error	40	185.7	4.641		
Total	41	693.6			

Cuadro A. 7.8.38 Resultados de la prueba Tukey para % CC CT1; % CC CT2; % CC CT3; % CC CF1; % CC CF2; % CC CF3

Factor	N	Mean	Grouping
% CC CF	30	10.908	A
% CC CT	12	3.210	B

Carbono fijo

Cuadro A. 7.8.39 Carbono fijo de los carbones según ensayo de carbonización

Parámetro	Carbón	Ensayo de carbonización			Media
		1	2	3	
Carbono fijo	Tarimas	63 ^a ± 1 ^b	69 ^a ± 3 ^b	69 ^a ± 4 ^b	67 ^a ± 3 ^b
	De la construcción	72,8 ^a ± 0,3 ^b	65,3 ^a ± 0,2 ^b	64,0 ^a ± 0,2 ^b	67 ^a ± 0,2 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

Cuadro A. 7.8.40 Resultados ANOVA para Carbono fijo CT y Carbono fijo CF.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	0.1700	0.1700	0.01	0.924
Error	4	65.8079	16.4520		
Total	5	65.9779			

Poder calórico (PC)

Cuadro A. 7.8.41 Poder calórico del carbón del residuo de tarimas y del residuo de la construcción.

Parámetro	Carbón	Ensayo de carbonización			
		1	2	3	Media
Poder calórico (MJ/kg)	Tarimas	29 ^a ± 4 ^b	29 ^a ± 2 ^b	29 ^a ± 3 ^b	29 ^a ± 3 ^b
	Corteza de tarimas	23 ± 1 ^b	26 ^a ± 1 ^b	23 ^a ± 0,3 ^b	24 ^a ± 1 ^b
	De la construcción	28 ^a ± 1 ^b	26 ^a ± 1 ^b	25 ^a ± 0,3 ^b	27 ^a ± 1 ^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar.

Cuadro A. 7.8.42 Resultados de ANOVA para PC CT1; PC CT2; PC CT3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	76.22	76.217	20.72	0.000
Error	40	147.13	3.678		
Total	41	223.34			

Cuadro A. 7.8.43 Resultados de ANOVA para % PC CZT1; % PC CZT2; % PC CZT3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	6.820	3.4099	5.15	0.107
Error	3	1.987	0.6622		
Total	5	8.806			

Cuadro A. 7.8.44 Resultados de ANOVA para PC CF1; PC CF2; PC CF3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	2	47.50	23.7498	39.64	0.000
Error	27	16.18	0.5992		
Total	29	63.68			

Cuadro A. 7.8.45 Resultados de la prueba Tukey para PC CF1; PC CF2; PC CF3

Factor	N	Mean	Grouping
% PC CF1	10	28.476	A
% PC CF2	10	26.216	B
% PC CF3	10	25.531	B

Cuadro A. 7.8.46 Resultados de ANOVA para PC CT; PC CF

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	48.82	48.818	22.78	0.000
Error	40	85.73	2.143		
Total	41	134.55			

Cuadro A. 7.8.47 Resultados de la prueba de Tukey para PC CT1; PC CF.

Factor	N	Mean	Grouping
% PC CT	12	29.128	A
% PC CF	30	26.741	B

Germinación (%G)

Cuadro A. 7.8.48 Resultados de ANOVA para %G 0% C, %G 1% CT1, %G 5% CT1, % G 10% CT1

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	3	175.0	58.33	1.64	0.220
Error	16	570.0	35.62		
Total	19	745.0			

Cuadro A. 7.8.49 Resultados de ANOVA para %G 0% C, %G 1% CT2, %G 5% CT2, % G 10% CT2

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	3	175.0	58.33	1.39	0.281
Error	16	670.0	41.87		
Total	19	845.0			

Cuadro A. 7.8.50 Resultados de ANOVA para %G 0% C, %G 1% CT3, %G 5% CT3, % G 10% CT3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	3	225.0	75.00	2.26	0.120
Error	16	530.0	33.12		
Total	19	755.0			

Cuadro A. 7.8.51 Resultado de ANOVA para %G 0% C, %G 1% CT1, %G 5% CT1, % G 10% CT1, %G 1% CT2, %G 5% CT2, % G 10% CT2, %G 1% CT3, %G 5% CT3, % G 10% CT3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	9	308.0	34.22	1.47	0.192
Error	40	930.0	23.25		
Total	49	1238.0			

Cuadro A. 7.8.52 Resultados de ANOVA para %G 0% C1; %G 1% CF1; %G 5% CF1; % G 10% CF1

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	3	43,75	14,58	1,06	0,393
Error	16	220,00	13,75		
Total	19	263,75			

Cuadro A. 7.8.53 Resultados de ANOVA para %G 0% C1; %G 1% CF2; %G 5% CF2; % G 10% CF2

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	3	25,00	8,333	1,67	0,214
Error	16	80,00	5,000		
Total	19	105,00			

Cuadro A. 7.8.54 Resultados de ANOVA para %G 0% C1; %G 1% CF3; %G 5% CF3; % G 10% CF3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	3	645,0	215,00	2,73	0,078
Error	16	1260,0	78,75		
Total	19	1905,0			

Cuadro A. 7.8.55 Resultados de ANOVA: %G 0% C1, %G 1% CF1, %G 5% CF1, % G 10% CF1

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	3	43.75	14.58	1.06	0.393
Error	16	220.00	13.75		
Total	19	263.75			

Cuadro A. 7.8.56 Resultados de ANOVA para %G 0% C1, %G 1% CF2, %G 5% CF2, % G 10% CF2

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	3	25.00	8.333	1.67	0.214
Error	16	80.00	5.000		
Total	19	105.00			

Cuadro A. 7.8.57 Resultado de ANOVA para %G 0% C1, %G 1% CF3, %G 5% CF3, % G 10% CF3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	3	645.0	215.00	2.73	0.078
Error	16	1260.0	78.75		
Total	19	1905.0			

Cuadro A. 7.8.58 Cuadro. Resultados de ANOVA para %G 0% C1, %G 1% CF1, % G 10% CF1, %G 5% CF2, % G 10% CF2, %G 1% CF3, %G 5% CF3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	6	774.3	129.05	2.68	0.035
Error	28	1350.0	48.21		
Total	34	2124.3			

Cuadro A. 7.8.59 Resultados de la prueba Tukey para %G 0% C1, %G 1% CF1, % G 10% CF1, %G 5% CF2, % G 10% CF2, %G 1% CF3, %G 5% CF3

Factor	N	Mean	Grouping
%G 0% C1	5	99.00	A
% G 10% CF2	5	98.00	A
%G 5% CF2	5	97.00	A B
%G 1% CF1	5	97.00	A B
% G 10% CF1	5	96.00	A B
%G 5% CF3	5	95.00	A B
%G 1% CF3	5	84.00	B

Pruebas de rechazo por lombrices (RL)

Cuadro A. 7.8.60 Resultados de ANOVA para RL 0% CT1, RL 1% CT1

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	0.9000	0.9000	0.95	0.359
Error	8	7.6000	0.9500		
Total	9	8.5000			

Cuadro A. 7.8.61 Resultado de ANOVA para RL 0% CT1, RL 5% CT1

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	0.1000	0.1000	0.14	0.720
Error	8	5.8000	0.7250		
Total	9	5.9000			

Cuadro A. 7.8.62 Resultado de ANOVA para RL 0% CT2, RL 1% CT2

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	6.400	6.400	2.91	0.126
Error	8	17.600	2.200		
Total	9	24.000			

Cuadro A. 7.8.63 Resultado de ANOVA para RL 0% CT2, RL 5% CT2

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	0.1200	0.1200	0.22	0.647
Error	10	5.4000	0.5400		
Total	11	5.5200			

Cuadro A. 7.8.64 Resultado de ANOVA para RL 0% CT3, RL 1% CT3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	16.900	16.9000	37.56	0.000
Error	8	3.600	0.4500		
Total	9	20.500			

Cuadro A. 7.8.65 Resultado de ANOVA para RL 0% CT3, RL 1% CT3

Factor	N	Mean	Grouping
RL 0% CT3	5	5.300	A
RL 1% CT3	5	2.700	B

Cuadro A. 7.8.66 Resultado de ANOVA para RL 0% CT3, RL 5% CT3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	25.600	25.6000	60.24	0.000
Error	8	3.400	0.4250		
Total	9	29.000			

Cuadro A. 7.8.67 Resultado de la prueba de Tukey para RL 0% CT3, RL 5% CT3

Factor	N	Mean	Grouping
RL 0% CT3	1	5.600	A
RL 5% CT3	1	2.400	B

Cuadro A. 7.8.68 Resultados de ANOVA para RL 0% CF1; RL 1% CF1

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	0,9000	0,9000	0,24	0,637
Error	8	300,000	37,500		
Total	9	309,000			

Cuadro A. 7.8.69 Resultados de ANOVA para RL 0% CF1_1; RL 5% CF1_1

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	0,00000	0,00000	0,00	1,000
Error	8	960,000	120,000		
Total	9	960,000			

Cuadro A. 7.8.70 Resultados de ANOVA para RL 0% CF2; RL 1% CF2

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	6,400	6,400	2,91	0,126
Error	8	17,600	2,200		
Total	9	24,000			

Cuadro A. 7.8.71 Resultados de ANOVA para RL 0% CF2_1; RL 5% CF2_1

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	3,600	3,600	3,60	0,094
Error	8	8,000	1,000		
Total	9	11,600			

Cuadro A. 7.8.72 Resultados de ANOVA para RL 0% CF3; RL 1% CF3

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	19.600	19.6000	65.33	0.000
Error	8	2.400	0.3000		
Total	9	22.000			

Cuadro A. 7.8.73 Resultados de la prueba de Tukey para RL 0% CF3; RL 1% CF3

Factor	N	Mean	Grouping
RL 0% CF3	5	5,200	A
RL 1% CF3	5	2,400	B

Cuadro A. 7.8.74 Resultados de ANOVA para RL 0% CF3_1; RL 5% CF3_1

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	0,1000	0,1000	0,02	0,901
Error	8	484,000	60,500		
Total	9	485,000			

Cuadro A. 7.8.75 Resultados de ANOVA para RL 0% CF1; RL 1% CF1; RL 0% CF1_1; RL 5% CF1_1; RL 0% CF2; RL 1% CF2; RL 5% CF2_1; RL 0% CF3; RL 1% CF3; RL 0% CF3_1; RL 5% CF3_1; RL 5% CF2_1; RL 0% CF3; RL 1% CF3; RL 0% CF3_1; RL 5% CF3_1

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	11	31,08	2,826	1,15	0,344
Error	48	117,60	2,450		
Total	59	148,68			

7.9 APÉNDICE 9. RESIDUOS DE LA EMPRESA MADERAS BOSQUE VERDE.

En este subapartado se muestran algunos de los residuos maderables que se generan en la empresa Maderas Bosque Verde, los cuales se utilizaron para carbonizarlos.

Los piezas largas se almacenan como pacas (Figura A. 7.9.1 Pacas de residuos maderables de la empresa Maderas Bosque Verde), mientras las piezas de cortas dimensiones se disponen en sacos grandes (Figura A. 7.9.2).



Figura A. 7.9.1 Pacas de residuos maderables de la empresa Maderas Bosque Verde



Figura A. 7.9.2 Saco de residuos maderables de la Empresa Maderas Bosque Verde.

7.10 APÉNDICE 10. DENSIDAD DEL RESIDUO DE LA CONSTRUCCIÓN

La densidad del residuo de la construcción se determinó mediante el método geométrico. Se evaluaron 12 piezas del residuo, las cuales se habían seleccionado anteriormente para calcular también su contenido de humedad.

Cuadro A. 7.10.1 Densidad del residuo maderable de la construcción.

Muestra	Densidad (método geométrico) g/cm³
1	0,424
2	0,443
3	0,330
4	0,442
5	0,308
6	0,500
7	0,469
8	0,452
9	0,466
10	0,481
11	0,514
12	0,514
Media	0,5^a±0,01^b

^a valor promedio. ^b desviación estándar. (Fuente: Pérez (2015)).

7.11 APÉNDICE 11. PRESUPUESTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL CARBONIZADOR

El presupuesto requerido para la construcción del carbonizador es de aproximadamente 160 000 colones, en el cual se podrían reducir los costos de los materiales, al reutilizar barriles.

Cuadro A. 7.11.1 Presupuesto para la construcción del carbonizador.

Material	Costo (CRC)
3 barriles con tapa	25 000
2 chimeneas	11 000
Tuberías y otras partes de plomería para las patas del carbonizador	14 000
Mano de obra	110 000
TOTAL	160 000