

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS
POR DESTILACIÓN SECA DEL BAMBÚ (*GUADUA
ANGUSTIFOLIA KUNTH.*) PROCEDENTE DEL DISTRITO
DE LA FLORIDA, SAN MIGUEL, CAJAMARCA.**

Presentado por:

Gisella Regina Gutierrez Tejada

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL

Lima - Perú
2015

DEDICATORIA

A Dios, por tantas bendiciones recibidas.

A mi madre Candelaria Tejada, por su dedicación, cuidado, amor, cariño y comprensión.

A mi abuelito Antonio Tejada, que aunque no esté a mi lado hoy, sigue guiando mi camino.

A mi hermana Flor por su paciencia y cariño.

A mis tíos y primos, por su cariño y apoyo incondicional.

A mis amigas Patricia, Janeth, Angélica, Marcia, Ximena y Tania por motivarme día a día a culminar con éxito este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento:

Al Dr. Enrique Gonzales Mora por ser un gran referente en mi formación profesional y por su apoyo incondicional para el término de este trabajo de investigación.

A la Lic. Deysi Guzmán por su apoyo durante toda la investigación, en especial en la fase de laboratorio.

Al laboratorio de Propiedades de Transformación Química de la Madera por brindarme todas las facilidades para el desarrollo de la investigación.

Al Sr. Rafael por su apoyo en la colección de las muestras en La Florida, Cajamarca.

A mis amigas Patricia Cabanillas y Janeth Huasasquiche por ayudarme en la etapa de destilación seca.

Al Sr. Kike por ayudarme en la colección y abastecimiento de leña en la retorta, durante la destilación.

A Ing. Ximena Tagle por su apoyo en los análisis estadísticos.

A la Sociedad Peruana de Bambú y a su presidenta la Arq. Tania Cerrón Oyague por brindarme su apoyo y colaboración.

A mi familia, quienes en todo momento me motivaron y ayudaron a la culminación de este trabajo de investigación.

RESUMEN

En la presente investigación se estudió la temperatura máxima y tiempo de destilación como factores que influyen en la obtención de carbón vegetal y licor piroleñoso, principales productos de la destilación seca; siendo cuatro los tratamientos aplicados (T1=450 °C, 120 min; T2=450 °C, 150 min; T3=500 °C, 120 min; T4=500 °C, 150 min). Así mismo, se evaluó la influencia de estos dos factores sobre las principales propiedades físico - químicas de los productos obtenidos. La materia prima utilizada fue la sección del culmo correspondiente a la cepa y basa de Bambú (*Guadua angustifolia* Kunth.) de cuatro años de edad, proveniente del distrito de La Florida, provincia de San Miguel, departamento de Cajamarca; realizándose como paso previo el análisis de composición química de la materia prima la cual contenía 24,07 por ciento de lignina; 68,30 por ciento de holocelulosa; 7,54 por ciento de extractivos y 3,02 por ciento de cenizas. En los rendimientos del proceso se encontró influencia significativa de los factores estudiados sobre los rendimientos de productos de destilación, existiendo relación inversa sobre los rendimientos de carbón vegetal y gases no condensables y relación directa sobre el rendimiento de licor piroleñoso. Además, se encontró influencia significativa de los factores sobre algunas propiedades del carbón vegetal como el contenido de material volátil (relación inversa), carbono fijo (relación directa); no hallándose diferencias significativas sobre el contenido de cenizas, poder calórico y densidad aparente. Finalmente, en el análisis de licor piroleñoso se halló influencia significativa directa de los factores sobre el contenido de alquitrán insoluble e influencias no significativas sobre las otras propiedades evaluadas, como contenido de alquitrán soluble, de acetona metanol y de ácido acético.

Palabras claves: *Guadua angustifolia* Kunth; destilación seca; carbón vegetal; licor piroleñoso; bambú; Cajamarca.

ÍNDICE GENERAL

	Página
I. Introducción	1
II. Revisión de Literatura	3
1. Especie estudiada (<i>Guadua angustifolia</i> Kunth.)	3
1.1. Origen, taxonomía y distribución	3
1.2. Descripción y morfología	4
1.3. Estados de madurez.....	6
1.4. Partes comerciales del culmo, tallo o caña	8
1.5. Requerimientos edafo – climáticos.....	9
1.6. Anatomía y composición química.....	10
1.7. Usos y productos	13
2. Carbonización y/o destilación seca	14
2.1. Proceso de destilación seca.....	15
2.2. Fases o etapas de destilación seca.....	17
2.3. Factores que influyen en el proceso de destilación seca.....	18
2.3.1. Temperatura de destilación seca.....	18
2.3.2. Tiempo y velocidad de calentamiento en el proceso de destilación seca.....	20
2.3.3. Características físico químicas del material vegetal.....	21
2.3.4. Contenido de humedad del material vegetal.....	22
2.4. Métodos de carbonización y/o destilación seca	22
2.5. Productos obtenidos en el proceso de destilación seca.....	23
2.6. Destilación seca de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth comparada con otros bambues	24
3. Carbón vegetal	25
3.1. Propiedades.....	25
3.1.1. Contenido de humedad.....	25
3.1.2. Contenido de carbono fijo	26
3.1.3. Material volátil	26
3.1.4. Contenido de cenizas	27
3.1.5. Poder calórico.....	27
3.1.6. Densidad aparente	28
3.1.7. Usos y calidad	29
3.2. Carbón vegetal de bambú	30
3.2.1. Usos y productos.....	30
3.2.2. Propiedades físico – químicas.....	31
4. Licor piroleñoso	32
4.1. Propiedades y composición química	32
4.1.1. Alquitranes.....	33
4.1.2. Metanol	33
4.1.3. Ácido acético	34
4.2. Usos.....	34
4.3. Licor piroleñoso de bambú	34
4.3.1. Usos y productos.....	34
4.3.2. Propiedades físico - químicas.....	35
III. Materiales y Métodos	37
1. Lugar de colección	37
2. Lugar de análisis	39
3. Materiales y equipos	39
3.1. Materia prima.....	39

3.2.	Materiales e instrumentos.....	42
3.3.	Equipos	45
4.	Metodología	46
4.1.	Acondicionamiento de la materia prima	46
4.2.	Destilación seca en retorta.....	47
4.3.	Molienda y tamizado de carbón obtenido.....	51
4.4.	Evaluación de materia prima y productos.....	52
4.4.1.	Caracterización química del culmo	52
4.4.2.	Evaluación del carbón vegetal	53
4.4.3.	Evaluación de licor piroleñoso.....	57
5.	Diseño experimental	61
IV.	Resultados y discusión	65
1.	Del análisis de la materia prima	65
2.	Del proceso de destilación seca.....	68
2.1.	Rendimiento de carbón vegetal.....	69
2.2.	Rendimiento de licor piroleñoso.....	72
2.3.	Rendimiento de gases no condensables.....	75
3.	Del análisis de carbón vegetal	76
3.1.	Contenido de humedad	78
3.2.	Contenido de material volátil y carbono fijo.....	78
3.3.	Contenido de cenizas.....	82
3.4.	Densidad aparente de carbón vegetal.....	83
3.5.	Poder calórico superior.....	86
4.	Del análisis de licor piroleñoso	87
4.1.	Rendimiento de alquitranes.....	88
4.2.	Porcentaje de acetona –metanol y ácido acético	91
V.	Conclusiones.....	93
VI.	Recomendaciones	95
VII.	Referencias bibliográficas	97
VIII.	Anexos	103

Índice de tablas

	Página
Tabla 1: Composición química de algunas especies de bambúes.	13
Tabla 2: Efecto de la temperatura sobre la composición química y rendimiento de carbón vegetal producido.	19
Tabla 3: Rendimiento de productos obtenidos por destilación seca con diferentes especies de bambú.	24
Tabla 4: Propiedades físicas- químicas del carbón vegetal de <i>Guadua angustifolia</i> , comparado con otras especies de bambúes	32
Tabla 5: Coordenadas UTM del lugar de colección de la caña.	38
Tabla 6: Diseño experimental del estudio.	62
Tabla 7: Comparación de los resultados de análisis de composición química de la materia prima*, con otros estudios realizados.	65
Tabla 8: Composición química de las cenizas de la materia prima.	67
Tabla 9: Rendimientos de productos obtenidos en el proceso de destilación seca*	68
Tabla 10: Comparación de rendimientos obtenidos en la destilación seca con otros estudios.	68
Tabla 11: Velocidades de calentamiento promedio de los tratamientos, en el proceso de destilación seca.	69
Tabla 12: Tiempo y velocidades de calentamiento por rangos de temperatura, aplicados en los diferentes tratamientos.	74
Tabla 13: Resultados del análisis de las propiedades físico – químicas del carbón vegetal obtenidos en los tratamientos.	77
Tabla 14: Comparación de los resultados obtenidos en la evaluación de las propiedades físico – químicas del carbón vegetal con otros estudios realizados para la misma especie.	77
Tabla 15: Análisis de las propiedades del licor piroleñoso obtenido bajo los diferentes tratamientos.	87

Índice de figuras

	Página
Figura 1: Rizoma de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.....	4
Figura 2: Culmo de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.....	5
Figura 3: Partes morfológicas de <i>Guadua angustifolia</i>	6
Figura 4: Estados de madurez de la caña de <i>Guadua angustifolia</i> K.....	7
Figura 5: Partes comerciales de la <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.	9
Figura 6: Composición anatómica del culmo de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.....	10
Figura 7: Haz vascular de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.	11
Figura 8: Alternativas productivas para el carbón de bambú y derivados	31
Figura 9: Mapa de ubicación geográfica del lugar de colección	37
Figura 10: Parcela de colección de muestras en La Florida – Cajamarca	38
Figura 11: Partes comerciales del culmo de <i>Guadua angustifolia</i>	40
Figura 12: Sección del culmo de <i>Guadua angustifolia</i> usado como muestra.	40
Figura 13: Procesamiento de las muestras de caña colectadas	41
Figura 14: Esquema del equipo de destilación seca por el método de retorta.....	45
Figura 15: Equipo de destilación fraccionada.	46
Figura 16: Equipo de destilación seca en retorta metálica usado en el estudio.....	48
Figura 17: Retorta metálica usada en la destilación seca.....	49
Figura 18: Cálculo del peso de carbón vegetal de bambú.....	50
Figura 19: Molienda y tamizado del carbón vegetal.....	51
Figura 20: Ensayo de material volátil.....	54
Figura 21: Ensayo de cenizas.....	55
Figura 22: Ensayo de alquitrán insoluble	57
Figura 23: Columna de destilación fraccionada para obtención de acetona-metanol.....	58
Figura 24: Ensayo de alquitrán insoluble en licor piroleñoso.....	59
Figura 25: Diagrama de flujo de la metodología aplicada en el proceso de destilación seca para la obtención de carbón vegetal y licor piroleñoso.....	61
Figura 26: Rendimiento de carbón vegetal en los diferentes tratamientos.....	71
Figura 27: Rendimiento de licor piroleñoso en los diferentes tratamientos.....	73
Figura 28: Rendimiento de GNC obtenidos en los diferentes tratamientos.....	75
Figura 29: Contenido de material volátil en los diferentes tratamientos.....	80

Figura 30:	Contenido de Carbono fijo en los diferentes tratamientos.....	81
Figura 31:	Contenido de cenizas en los diferentes tratamientos.....	83
Figura 32:	Densidad aparente de carbón vegetal entero (g/cm ³) en los diferentes tratamientos.	84
Figura 33:	Densidad aparente de carbón vegetal molido (g/cm ³) en los diferentes tratamientos.	85
Figura 34:	Poder calórico de carbón vegetal obtenido en los diferentes tratamientos.....	86
Figura 35:	Porcentaje de alquitrán insoluble obtenido en los diferentes tratamientos.....	89
Figura 36:	Porcentaje de alquitrán soluble obtenido bajo los diferentes tratamientos.....	90
Figura 37:	Porcentaje de acetona- metanol obtenido en los tratamientos.	91
Figura 38:	Porcentaje de ácido acético obtenidos en los tratamientos.	92

Índice de anexos

	Página
Anexo 1 Cuadro de resultados promedio.....	103
Anexo 2 Análisis estadístico para el rendimiento de carbón vegetal.....	105
Anexo 3 Análisis estadístico para el rendimiento de licor piroleñoso	106
Anexo 4 Análisis estadístico para el contenido de humedad	107
Anexo 5 Análisis estadístico para el contenido de material volátil.....	108
Anexo 6 Análisis estadístico para el porcentaje de carbono fijo.....	109
Anexo 7 Análisis estadístico para el porcentaje de cenizas.....	110
Anexo 8 Análisis estadístico para la densidad aparente de carbón entero y molido	111
Anexo 9 Análisis estadístico para el poder calórico superior.....	113
Anexo 10 Análisis estadístico para el porcentaje de alquitrán insoluble	114
Anexo 11 Análisis estadístico para el porcentaje de alquitrán soluble	115
Anexo 12 Análisis estadístico para el porcentaje de acetona – metanol.....	116
Anexo 13 Análisis estadístico para el porcentaje de ácido acético	117
Anexo 14 Determinación del contenido de humedad.....	118
Anexo 15 Determinación del contenido de material volátil.....	119
Anexo 16 Determinación del contenido de cenizas.....	120
Anexo 17 Resultados del poder calórico inferior de las muestras	121

I. INTRODUCCIÓN

El bambú es considerado un producto forestal no maderable de gran importancia para el desarrollo de las economías locales de América Latina, dado su rápido crecimiento, fácil manejo y amplia distribución (Londoño 2002). Comprende varios géneros, siendo los más importantes *Phyllostachis*, *Bambusa*, *Dendrocalamus*, *Gigantochloa*, *Chusquea* y *Guadua*, estas dos últimas endémicas en Sudamérica (Espinoza 2010).

Según Martínez (2005) la *Guadua angustifolia* Kunth es una de las especies de mayor demanda y mejor aceptación por parte del sector productivo, brindando además una serie de beneficios económicos, sociales y ambientales a las comunidades.

En el Perú, es la especie de bambú más utilizada debido a la resistencia de sus culmos que la hacen deseable para su uso en construcciones, generalmente rurales (Espinoza 2010). Pese a ello, existen pocas experiencias de plantaciones manejadas, siendo cultivada con fines de producción solo en algunas regiones como Piura, Cajamarca, Amazonas, Lambayeque y Lima (Takahashi y Ascencios 2004), y su mercado actual está principalmente orientado al uso del culmo como material de construcción. Sin embargo, existen muchas posibilidades de desarrollo de nuevos productos y usos aún no explorados (Espinoza 2010).

Uno de los productos de potencial desarrollo es el carbón vegetal de bambú caracterizado por su alta porosidad y gran capacidad de absorción que le permite desodorizar, desinfectar, purificar, absorber humedad e inclusive bloquear las ondas electromagnéticas, además de tener un alto poder calorífico (Velásquez 2010). Igualmente, el vinagre de bambú una vez refinado puede procesarse para obtener diversos productos como aromas, antisépticos, pesticidas y presevantes, además de tener algunos otros usos como medicinales y agrícolas (Mejía 2011).

Estos productos (carbón vegetal y licor piroleñoso) son obtenidos mediante el proceso de destilación seca, desarrollado hacia fines del siglo XIX (Bueno 1987) y usado inicialmente

para la producción de compuestos químicos, como: metanol, ácido acético, acetona, terpenos, fenoles y alquitranes de madera (Sanabria 2007).

Hoy en día este proceso es llevado a cabo en hornos de acero tipo retorta, teniendo como productos además del carbón vegetal, un destilado formado a partir de gases y vapores compuestos por dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrógeno, metano, etileno, metanol, ácido acético, acetona, ácido fórmico, entre otros; también contienen componentes que se condensan para formar alquitrán de madera (Stassen 2002).

Actualmente, el uso de la tecnología de destilación seca no solo permite la obtención de carbón vegetal, licor piroleñoso y gases, sino que también minimiza el impacto ambiental generado por otros métodos de carbonización (hornos de ladrillo, parvas, entre otros) haciendo sustentable la producción de carbón vegetal de bambú.

En este trabajo se realizó un estudio de caracterización de los productos: carbón vegetal y licor piroleñoso, obtenidos por el proceso de destilación seca bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) procedente del distrito de La Florida, provincia de San miguel, departamento de Cajamarca. Para ello se evaluó la influencia del tiempo y temperatura sobre las principales propiedades físico - químicas de los productos obtenidos; con la finalidad de proponer nuevas alternativas de uso de esta especie en el país.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

1. ESPECIE ESTUDIADA (*GUADUA ANGUSTIFOLIA* KUNTH.)

1.1. ORIGEN, TAXONOMÍA Y DISTRIBUCIÓN

La caña guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) es originaria de América Latina, particularmente de la cuenca amazónica de Ecuador y Colombia (SNV, citado por Chiluiza 2009).

La clasificación taxonómica de esta especie se detalla a continuación (Castaño 2001):

Reino: PLANTAS

División: SPERMATOFITAS

Subdivisión: ANGIOSPERMAS

Orden: GLUMIFLORALES

Clase: MONOCOTILEDONEAS

Familia: POACEAE o GRAMINEAE

Subfamilia: BAMBÚSOIDEAE

Supertribu: BAMBÚSODAE

Tribu: BAMBÚSEAE

Subtribu: GUADINAE

Género: GUADUA

Especie: *Guadua angustifolia* Kunth 1822

Sinonimia: caña brava, caña mansa, garipa (Colombia); caña brava, caña mansa (Ecuador); guadua, ipa, marona (Perú); juajua, puru puru (Venezuela); tarro, otate (América central) (Martínez 2005).

Castaño (2004) señala que esta especie crece de forma natural en los países de Colombia, Ecuador y Venezuela, aunque ha sido introducida a varios países de Suramérica, Centroamérica y el Caribe, inclusive a algunos de Asia, América del Norte y Europa.

1.2. DESCRIPCIÓN Y MORFOLOGÍA

Esta especie sobresale dentro del género *Guadua* por sus excelentes propiedades físicas mecánicas y por el tamaño de sus culmos que pueden alcanzar los 30 m de altura y 25 cm de diámetro (Martínez 2005). Botero (2004) afirma que esta especie es de rápido crecimiento y alta productividad, que puede ser aprovechada y utilizada entre los cuatro y cinco años de edad.

En esta especie morfológicamente se pueden distinguir las siguientes partes: raíz, tallo, hojas, flores y frutos, descritas a continuación (Chiluiza 2009):

Rizoma: es un eje segmentado y subterráneo que constituye la estructura de soporte de la planta y es responsable de la absorción de nutrientes (Ver figura 1)



Figura 1: Rizoma de *Guadua angustifolia* Kunth.

FUENTE: Chiluiza 2009

Culmo o tallo : constituye el eje aéreo segmentado que emerge del rizoma, es leñoso, recto y ligeramente arqueado en la punta. Según lo mencionado por Hidalgo, citado por Moreno *et al.* (2006), en el culmo se distinguen tres partes: basal, medio y apical (Ver figura 2).



Figura 2: Culmo de *Guadua angustifolia* Kunth.

FUENTE: Chiluiza 2009

Ramas: se originan en las yemas nodales del culmo, clasificandose de acuerdo a su posición en basales y apicales (Londoño, citado por Chiluiza 2009).

Hojas caulinares: son hojas modificadas que se caracterizan por su fuerte consistencia coriacea, son de forma triangular y tienen la función de proteger a las yemas que se originan en las ramas y follaje (Londoño, citado por Chiluiza 2009).

Hojas ramales o hojas de follaje: crecen en el extremo superior del culmo, son simples, alternas y lanceoladas.

Inflorescencia: es una panícula con flores pequeñas e imperfectas, de hasta 9 cm de longitud que se encuentran ubicadas en los extremos de las ramas. Son bisexuales, poco vistosas y de color rosado claro (Hidalgo, citado por Chiluiza 2009).

Fruto: son poco abundantes, solitarias, de tipo cariopside, seco e indehiscente; ubicados en el primer tercio de la inflorescencia o espiga .



Figura 3: Partes morfológicas de *Guadua angustifolia*

FUENTE: Chiluiza 2009

Dónde:

- a) Hoja caulinar
- b) Hojas ramales
- c) Inflorescencia

1.3. ESTADOS DE MADUREZ

Según Castaño (2004), esta especie tiene cuatro estados de madurez: brote, juvenil (verde o viche), madura (adulta o hecha), sobre madura o seca.

Brote o renuevo: es la primera fase de desarrollo, comprendida desde la aparición del rebrote hasta que llega a su máxima altura. Esta etapa tiene una duración aproximada de seis meses, en este tiempo el culmo se encuentra totalmente cubierto por hojas caulinares.

Juvenil: se inicia cuando empieza el desarrollo de las ramas apicales y el follaje crece gradualmente. En este periodo el culmo elimina totalmente las hojas caulinares de la parte superior conservando únicamente las basales, sus entrenudos son de color verde intenso y se aprecian claramente las bandas nodales. La duración aproximada de esta etapa es de uno a dos años.

Madura: en esta etapa todo el culmo se cubre de hongos, desaparecen las manchas nodales y aparecen algunos musgos y líquenes en los nudos, su color se generaliza en tono grisáceo, no hay hojas caulinares en ninguna parte del culmo y adquiere su mayor grado de resistencia, por lo que es el estado ideal para usos industriales.

Sobre madura: en esta etapa los culmos están cubiertos por hongos y líquenes en su totalidad, presentando un aspecto gris blancuzco. No hay presencia de follaje y se da una pérdida de resistencia mecánica del culmo.

Castaño (2001) indica que los cambios en la coloración del culmo son característicos en cada una de las cuatro fases de maduración (Ver figura 4):

- En estado renuevo (R) un color carmelita debido a la hoja caulinar que lo protege.
- En estado juvenil (J) un color verde intenso con nudos blancos.
- En estado maduro (M) un color grisáceo por la presencia de líquenes en su corteza.
- En estado seco o sobre maduro (S) un color amarillo.

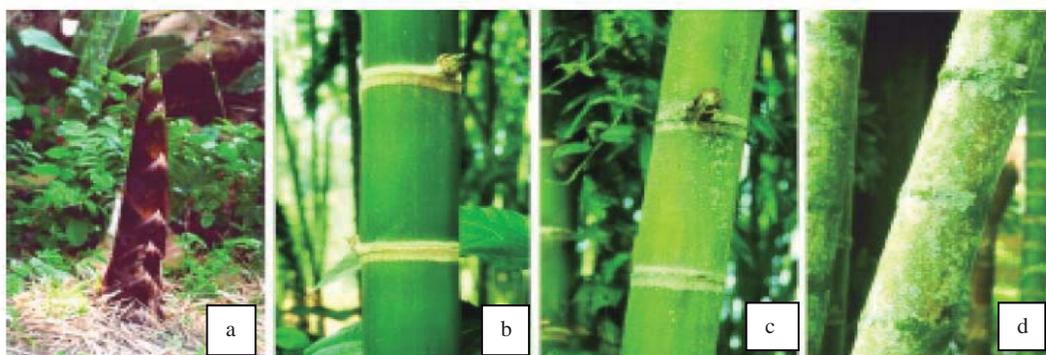


Figura 4: Estados de madurez de la caña de *Guadua angustifolia* K.

FUENTE: Castaño 2004

Dónde:

- a) Renuevo
- b) Joven
- c) Maduro
- d) Sobre maduro

1.4. PARTES COMERCIALES DEL CULMO, TALLO O CAÑA

El culmo posee varias partes comerciales de diferentes características técnicas, designándose su uso a diferentes aplicaciones como la construcción, artesanías, muebles, producción de latas, pisos laminados, entre otras; estas partes son cepa, basa, sobrebasa y varillon, todas de cuatro metros de longitud (Held 2003). Así mismo, Castaño (2004) menciona que de cada culmo se obtienen cuatro piezas comerciales de cuatro metros de largo, cuyas características más importantes son descritas a continuación: (Ver figura 5)

Cepa: esta sección corresponde a la parte basal del culmo; caracterizado por tener el mayor diámetro y resistencia mecánica, dada la corta distancia entre sus nudos y al espesor de sus paredes. Tiene aproximadamente cuatro metros de longitud.

Basa: sección de mayor importancia comercial por su excelente relación peso- resistencia y mayor uniformidad de diámetro, es la parte más homogénea en cuanto a la distancia entre los nudos y el grosor de sus paredes. Su longitud varía de cuatro a ocho metros.

Sobrebasa: en esta sección el diámetro y espesor de sus paredes son constantes, tiene aproximadamente cuatro metros de longitud.

Varillon: Es la parte terminal del culmo su longitud varía entre dos a cinco metros y su diámetro no es uniforme.

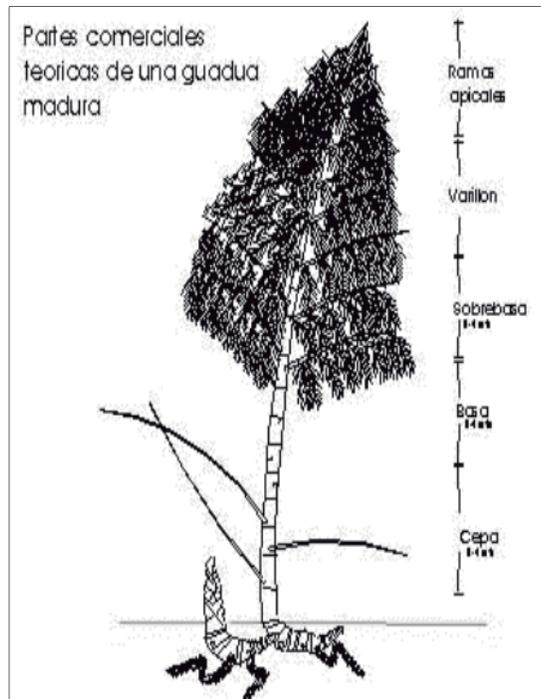


Figura 5: Partes comerciales de la *Guadua angustifolia* Kunth.

FUENTE: Held 2003

1.5. REQUERIMIENTOS EDAFO – CLIMÁTICOS

Los aspectos ecológicos que regulan el desarrollo de esta especie pueden analizarse a través del concepto de “Calidad de sitio”. Aunque en la práctica son muchos los factores biofísicos que influyen en su desarrollo, los más determinantes son los climáticos y edáficos (Castaño 2001).

Botero (2004) indica que el mejor desarrollo de esta especie se logra en sitios con altitudes comprendidas entre 1 300 y 1 500 m.s.n.m. y por lo general en suelos francos, fértiles, de buen drenaje, ubicados en valles y zonas onduladas de montaña.

El rango óptimo de temperatura requerida para esta especie oscila entre 20 °C y 26 °C. Además, prefiere una humedad relativa de 75 a 85 por ciento y una luminosidad entre 1 800 y 2 000 horas/luz por año (Held 2003). Su desarrollo más eficiente se da donde la precipitación está entre 1 000 y 2 500 mm/año (Giraldo, citado por Rodríguez 2005).

1.6. ANATOMÍA Y COMPOSICIÓN QUÍMICA

La anatomía del culmo está formada por: epidermis o capa exterior, capa interior y el área fibro-vascular, esta última localizada entre las dos anteriores y formada por células parenquimatosas que constituyen el tejido del tallo, los haces vasculares como tejido conductivo y las fibras (Moreno *et al.* 2006).

Londoño *et al.* (2002) señala que el tejido del culmo de esta especie está compuesto, como en los otros bambúes por: a) corteza; b) células de parénquima; c) fibras y d) haces vasculares los cuales están conformados por células de esclerenquima, vasos (metaxilema, floema, protoxilema) y por tubos cribosos con células acompañantes. La composición anatómica es: 51 por ciento de tejido de parénquima, 40 por ciento de fibra y 9 por ciento de células de conducción (Ver figura 6).

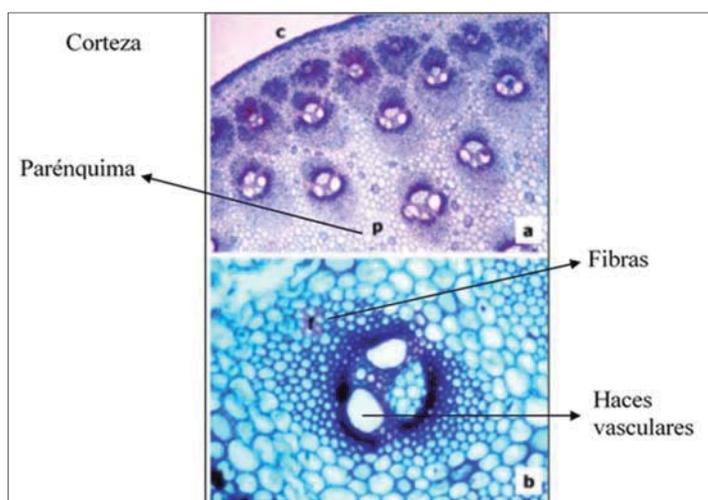


Figura 6: Composición anatómica del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth.

FUENTE: Londoño *et al.* 2002

A continuación se describen los componentes anatómicos del culmo:

Corteza: parte externa del culmo; su función es prevenir la pérdida de agua y proteger el tejido. Tiene alta concentración de cuerpos silicios que contribuyen a la dureza de su madera (Liese, citado por Londoño *et al.* 2002).

Parénquima: tejido compuesto por células largas y cortas. Las células largas, generalmente tienen paredes gruesas y se lignifican con el tiempo; las células cortas son más pequeñas, de forma cúbica y de citoplasma más denso, tiene paredes delgadas y no se lignifican con la edad. (Liese, citado por Londoño *et al.* 2002).

Haces vasculares: estos determinan la estructura anatómica del culmo, se encuentran embebidos en el tejido del parénquima. Su tamaño, forma, número y concentración varía desde la periferia hacia la sección interior de la caña, y desde la base hacia su vértice. Cerca de la periferia, los haces vasculares son pequeños, numerosos y concentrados, mientras que en la sección media de la caña son más grandes y ampliamente espaciadas (Grosser y Liese, citados por Londoño *et al.* 2002). Un haz vascular de esta especie está formado por dos grandes vasos de metaxilema, uno o dos elementos de protoxilema, el floema, la vaina esclerénquima y fibras (Londoño *et al.* 2002) (Ver figura 7).

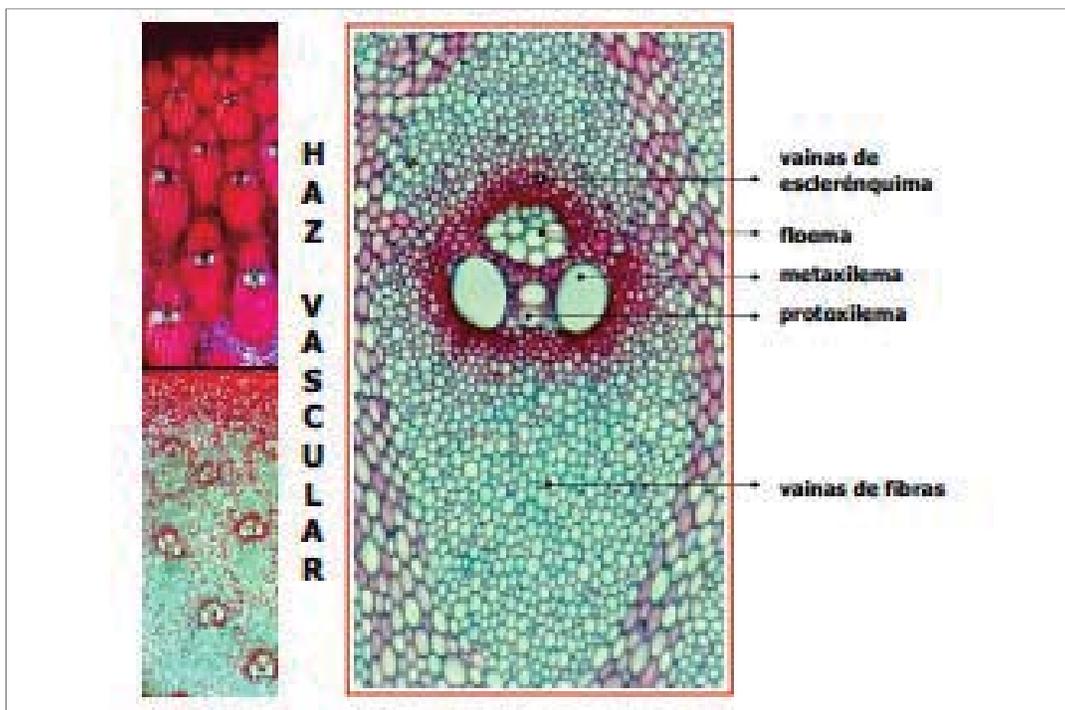


Figura 7: Haz vascular de *Guadua angustifolia* Kunth.

FUENTE: Londoño *et al.* 2002

Fibras: las fibras de esta especie se caracterizan por su forma delgada, larga y cónica en ambos extremos. El contenido de fibras por paquete vascular oscila de 64,8 a 97,2 por ciento, con un mayor porcentaje en los haces vasculares de las zonas periféricas y en transición, que en los haces vasculares de la zona media e interna (Liese, citado por Londoño *et al.* 2002).

La composición química del bambú es similar al de la madera, el 90 por ciento lo constituyen sustancias estructurales que conforman la pared celular, donde se encuentran sus principales macromoléculas: celulosa, hemicelulosa y ligninas. En menor proporción se encuentran los compuestos solubles en agua, azúcares, almidón, taninos, ceras y sales inorgánicas (Liese y Kumar 2003).

En el análisis de composición química realizado para esta especie, Salgado y Azini (1992), encontraron 20,60 por ciento de lignina; 60,40 por ciento de holocelulosa y 19,00 por ciento de extractivos totales. Así mismo, Cuellar (2009) en el análisis de composición química de culmos de entre tres a cinco años de edad proveniente de la zona de Caldas halló un 58,88 por ciento de holocelulosa; 21,88 por ciento de lignina; 6,47 por ciento de extractivos (solubles en etanol) y 3,80 por ciento de cenizas.

Chiluzza (2009) obtuvo un 19,72 por ciento de lignina; 71,42 por ciento de holocelulosa; 5,16 por ciento de cenizas en cañas de guadua de 5 años de edad proveniente de un bosque nativo en la provincia del Pastaza. Finalmente, Gonzales (2002), en un estudio realizado en Madre de Dios - Perú, encontró 71,16 por ciento de holocelulosa; 22,70 por ciento de lignina, 5,85 por ciento de cenizas; 4,29 por ciento de sílice y 0,89 por ciento de extractivos en alcohol – benceno.

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos del análisis de composición química realizado por Otavio *et al.* (1987) para diferentes especies de bambúes en comparación con la *Guadua angustifolia* Kunth.

Tabla 1: Composición química de algunas especies de bambúes.

<i>Material</i>	<i>Lignina (%)</i>	<i>Holocelulosa (%)</i>	<i>Extractivos totales (%)</i>
<i>Bambusa vulgaris vittata</i>	20,2	66,1	13,7
<i>Bambusa tuldooides</i>	19,0	66,7	14,3
<i>Bambusa vulgaris</i>	17,5	66,3	16,2
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	23,4	63,7	12,9
<i>Guadua angustifolia</i>	20,6	60,4	19,0
Promedio	20,1	64,6	15,2

FUENTE: Otavio et al. (1987)

En cuanto a los extractivos, Li, citado por Chiluzza (2009), señala que éstos en los bambúes están formados por resinas, ceras, grasas y gomas. Arrabal y Montoya (2013) en un estudio realizado para esta especie obtuvo valores de concentración de extractivos de 16,10 por ciento extraídos con acetona y 11,60 por ciento con agua.

Los estudios realizados por Chen, citado por Londoño *et al.* (2002) indican que la composición de cenizas cambia significativamente entre cañas de uno a siete años de edad, observándose una disminución en el contenido de cobre, zinc, fósforo, hierro y potasio y un aumento en calcio, magnesio y manganeso. Así también, Li, citado por Chiluzza (2009), afirma que la ceniza de los bambúes está compuesta principalmente por sílice, calcio, potasio, manganeso y magnesio, afirmando que el porcentaje de sílice es mayor en los nudos y la epidermis.

1.7. USOS Y PRODUCTOS

La mayor aplicación de uso de culmos de esta especie se da en la construcción, fabricación de muebles, cestería, artesanías, papel, rayón y como recurso natural para la conservación del medio ambiente (Takahashi 2012).

Botero (2004) asegura que el bambú presenta un sin número de aplicaciones en la vida diaria de los pobladores rurales, desde instrumentos musicales, utensilios para el hogar, artesanías, muebles, herramientas, hasta material de construcción para infraestructuras

agropecuarias, grandes construcciones y por supuesto su industrialización, convirtiéndolo en productos tales como laminados elaborados con tablillas de bambú, los paneles o tableros, el papel, carbón vegetal y derivados químicos.

2. CARBONIZACIÓN Y/O DESTILACIÓN SECA

La carbonización es el proceso que ocurre cuando el material es quemado en presencia de cantidades controladas de oxígeno, con temperaturas mayores a 300 °C, ocurriendo desprendimiento de vapor de agua, líquidos orgánicos, gases no condensables y concentración de carbono fijo en forma de carbón (Gomez y Oliveira 1982). De igual manera, Bueno (1987) define a la carbonización como un proceso donde se realiza la combustión parcial de la madera, controlando la admisión de aire durante el proceso y donde los productos volátiles de descomposición térmica son liberados al medio ambiente, teniendo únicamente como producto final el carbón vegetal.

Cuando el proceso de obtención de carbón se realiza en ausencia completa de aire y con la recuperación de los productos de la carbonización, realizándose la condensación de los gases condensables y utilizándose los gases no condensables, se denomina destilación seca (Mohan *et al.* 2006).

Según Ayahn, citado por Sanabria (2007) en los procesos de destilación seca de la madera, el calor necesario para transformar la madera en carbón es suministrado externamente. De esta manera la temperatura del proceso de carbonización es controlada, y al ser realizado sin oxígeno, se observa un mayor rendimiento de transformación de madera en carbón; por consiguiente, la calidad del carbón vegetal obtenido y su rendimiento en peso, es mejor y más homogéneo.

Bueno (1987) señala que en el proceso de destilación seca se da la recuperación de todos los productos: sólidos (carbón vegetal), líquidos (licor piroleñoso) y gaseosos (gases no condensables: CO, CO₂ y CH₄, principalmente) generados.

2.1. PROCESO DE DESTILACIÓN SECA

En el proceso de destilación seca cuando la temperatura del material de madera supera la temperatura de secado (cuando ya no existe agua libre) comienza una reacción de descomposición exotérmica en el que se libera el agua de constitución y pequeñas cantidades de monóxido y dióxido de carbono, incluso cuando el calentamiento ha estado fuera de contacto con el aire. Esta reacción es lenta a bajas temperaturas por lo que el calor producido se disipa inmediatamente, pero cuando la temperatura externa aumenta, la velocidad de la reacción exotérmica aumenta rápidamente. Si continúa el calentamiento, la velocidad de la reacción exotérmica se hace tan grande que la temperatura en el interior del material leñoso excede la temperatura exterior, a esta temperatura crítica se le conoce como temperatura de reacción exotérmica, que en el caso de una planta leñosa seca es 270-280 °C. Entre 280 °C y 380 °C se producen grandes cantidades de alcohol, especialmente ácido acético y metanol, posteriormente cantidades cada vez mayores de alquitrán y productos gaseosos (Sardinha 2002).

Cuando la biomasa es calentada ocurre la escisión térmica de la celulosa, hemicelulosa y lignina. Estas reacciones se denominan reacciones primarias de pirólisis. Las especies que se forman mediante este paso inicial de despolimerización pueden no ser lo suficientemente volátiles y podrían experimentar reacciones adicionales de ruptura de enlaces para formar productos volátiles entre 200 y 400 °C o podrían sufrir reacciones de condensación y polimerización para formar un producto carbonoso sólido (García *et al.* 2008).

Existen por lo menos dos mecanismos competitivos para la formación de carbón durante el proceso de destilación seca: uno iniciado y catalizado por algunos metales y el otro debido a las reacciones de condensación no catalíticas de los productos de la pirolisis. Siendo las reacciones que llevan la generación de volátiles usualmente endotérmicas, mientras que las reacciones de aromatización que llevan a la formación de carbón más condensados son usualmente exotérmicas (Antal y Gronli, citado por García *et al.* 2008).

De los tres componentes químicos principales, las hemicelulosas son las más susceptibles a la degradación térmica, seguida por la celulosa; por otro lado la lignina se presenta como el componente más estable, comenzando a presentar cambios estructurales a temperaturas inferiores a 200 °C, siendo el componente que contribuye más a la formación del carbón en

el proceso de degradación térmica (Rowell, citado por Moura 2007). Mohan *et al.* (2006) señala que las hemicelulosas comienzan los procesos de descomposición térmica cerca de 180 °C y es la responsable en gran medida de la generación de gases. La celulosa comienza a degradarse entorno a los 240 °C y la lignina a 280 °C.

Así mismo Shafizadeh y Chin (1977) señalan que las hemicelulosas comienzan a perder peso a temperaturas alrededor de 225 °C y al ser el componente menos estable su degradación es casi completa a 325 °C. La degradación térmica de la celulosa procede rápidamente entre 325 °C y 375 °C, en un corto intervalo de temperatura, causando cambios drásticos en su comportamiento, con la pérdida de aproximadamente 77 por ciento de su peso.

Según lo mencionado por Oliveira, citado por Santos *et al.* (2010), las celulosas y hemicelulosas a altas temperaturas de calentamiento contribuyen muy poco a la formación de carbón vegetal en el proceso. Balat, citado por Crespo y Folgueras (2011), señala que la degradación térmica de la hemicelulosa produce principalmente agua, metanol, ácido fórmico, acético y propionico, propanona, butanona y furfuraldehído.

La lignina se descompone gradualmente en un rango de temperatura de 250 °C a 500 °C debido a su estructura relativamente compleja, siendo la descomposición más rápida entre 310 °C y 420 °C, y es el carbón vegetal el producto más abundante de su degradación con un rendimiento de 55 por ciento; la segunda fracción más abundante de productos pirolíticos obtenidos son los destilados acuosos, con un rendimiento de 20 por ciento, que contienen agua, metanol, acetona y ácido acético; la tercera fracción es el alquitrán con un 15 por ciento de rendimiento y la última fracción está formada por productos volátiles como el CO, CH₄, CO₂ y etano, con un rendimiento aproximado de 12 por ciento (Shafizadeh y Chin 1977).

Brebu, citado por Chavez y Domine (2013) señala que el alquitrán marrón producido en pirolisis, contiene compuestos de alto peso molecular derivados de la lignina, mientras que la fracción soluble en agua; que representa el 60 a 70 por ciento en peso del aceite; contiene sustancias de peso molecular inferior.

2.2. FASES O ETAPAS DE DESTILACIÓN SECA

En la destilación seca los destilados se forman a partir de 100 °C (agua y volátiles de bajo punto de ebullición), los otros destilados provienen de las hemicelulosas (a partir de 200 °C), de la lignina (entre 250 a 425 °C) y de la celulosa (entre 290 a 340°C) (Wenzl, citado por Gonzales 2002).

Según Quinseng *et al.* (2003) las etapas del proceso se pueden dividir en cuatro de acuerdo al cambio de temperatura:

Etapa de secado: la temperatura en esta etapa es inferior a 150 °C. Brito (1990) coincide con Quinseng *et al.* (2003) al afirmar que en esta etapa se da la pérdida de humedad, liberándose agua y dióxido de carbono. Según Oliveira, citado por Cámara (2007), en esta etapa también se libera ácido fórmico y ácido acético.

Etapa pre-carbonización: la temperatura en esta etapa se eleva de 150 a 275 °C. Comienzan a darse cambios en la composición química y la parte inestable de las hemicelulosas comienzan a reaccionar. Según Oliveira, citado por Santos *et al.* (2010), se producen los mismos gases que en la etapa anterior, con una disminución sustancial de vapor de agua y apareciendo el monóxido de carbono. Estas reacciones son de naturaleza endotérmica, produciéndose una fracción de licor piroleñoso y pequeñas cantidades de gases no combustibles.

Etapa de Carbonización: la temperatura en esta etapa se eleva de 275 a 450 °C, el calor se desarrolla rápidamente y se presentan grandes cambios en la composición química, que dan lugar a la liberación de gases (metano y etileno), formación de alquitranes y líquido piroleñoso.

Pacheco (2005) señala que en esta etapa se dan las reacciones exotérmicas, ya que eliminada el agua, sube fuertemente la temperatura, iniciándose la descomposición de la madera, liberándose con el humo sustancias como ácido acético, alcohol metílico y alquitrán. Almeida, citado por Santos *et al.* (2010), señala que la mayor parte de alquitrán y ácido piroleñoso son producidos durante esta fase.

Etapa final: la temperatura en esta etapa se eleva de 450 a 500 °C; se caracteriza por el aumento del contenido de carbono en el carbón y disminución en el contenido de materiales volátiles; hay gran producción de alquitrán y el material volátil residual se libera.

2.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE DESTILACIÓN SECA

La destilación seca es uno de los principales métodos de conversión termoquímica para convertir la madera en productos de carbón sólido, líquidos y gases. Los rendimientos de productos dependen de las condiciones del proceso, como: la presión de pirólisis, velocidad de calentamiento, temperatura final, tipo de reactor, importe inicial de entrada y tamaño de partícula.

Aunque hay muchos factores de operación, se ha encontrado que la velocidad de calentamiento y la temperatura son las variables más importantes en el análisis de rendimientos de productos y composiciones químicas (Ratanapisit 2009). Gomez y Wolfgang (2008) señalan que el perfil tiempo - temperatura al que se somete la biomasa afecta la rapidez, extensión en que se presentan las reacciones químicas y la distribución y composición de los productos obtenidos.

2.3.1. TEMPERATURA DE DESTILACIÓN SECA

La temperatura final de destilación seca es uno de los factores de mayor influencia en los rendimientos gravimétricos y de composición de los productos; según lo señalado por Pacheco (2005) el aumento de esta variable origina un aumento de los rendimientos de líquido y gas, con la consiguiente reducción del rendimiento del carbón vegetal, siendo la temperatura óptima entre 400 y 450 °C. Esto muestra que al aumentar la temperatura de producción de carbón se produce la pérdida de volátiles que enriquecerá la fase gaseosa y líquida. Esta expulsión de material volátil provoca un aumento en el contenido de carbono fijo, es decir, una mejora en la calidad de carbón producido (Oliveira; citado por Santos *et al.* 2010). En la práctica, el carbón vegetal obtenido por debajo de 260 °C es muy impuro y

de mala calidad ya que contiene materias volátiles que se desprenderán durante la combustión con gran emisión de humos (Romahn; citado por Rojas 2014).

Así mismo, FAO (1983) señala que un parámetro que regula la composición química del carbón vegetal durante la destilación es la temperatura; al aumentar esta variable, disminuye el rendimiento del carbón porque aumenta el rendimiento del líquido y los gases que destila la madera, por lo tanto también disminuye el contenido de material volátil.

En la Tabla 2 se puede observar el efecto de la temperatura sobre la composición química del carbón vegetal producido y sobre su rendimiento (Romah, citado por Rojas 2014).

Tabla 2: Efecto de la temperatura sobre la composición química y rendimiento de carbón vegetal producido.

<i>Temperatura de obtención (°C)</i>	<i>Composición</i>			<i>Rendimiento de carbón vegetal en base seca (%)</i>
	<i>C%</i>	<i>H%</i>	<i>O%</i>	
200	52,30	6,30	41,40	91,80
250	70,60	5,20	24,20	65,20
300	73,20	4,90	21,90	51,40
400	83,70	3,80	13,50	37,80
500	89,60	3,10	6,70	33,00
600	92,60	2,60	5,20	31,00
700	93,70	2,40	4,80	28,70
800	95,80	1,00	3,30	26,70

FUENTE: Romah, citado por Rojas 2014

La composición de los gases de salida de la retorta también dependen sensiblemente de la temperatura interna. Hasta los 280 °C se desprenden gases oxigenados (CO y CO₂) que irán cediendo lugar a los gases hidrogenados cuando la temperatura del proceso aumenta hasta los 500 °C. Así mismo, se espera que a mayor temperatura se de un mayor enriquecimiento del poder calorífico de los gases producidos, incrementándose los gases combustibles (principalmente CH₄) y reduciéndose los niveles de CO₂. (Santos *et al.* 2010).

La recuperación de alquitrán insoluble depende sensiblemente de la temperatura final del proceso, según lo indicado por Oliveira, citado por Santos *et al.* (2010), quien afirma que el aumento de la temperatura final del proceso aumenta la recuperación de alquitrán. Además, indica que su formación comienza desde los 150 °C, pasando a través de un máximo intervalo de producción entre los 200 °C a 340 °C, produciéndose casi el 90 por ciento de alquitrán y se da hasta la temperatura final de 450 °C.

Cuando la temperatura de destilación seca se eleva demasiado, el aumento observado en el nivel de carbono fijo no es muy relevante; según lo investigado por Santos *et al.* (2010), una temperatura de 500 °C es suficiente para producir un carbón vegetal de calidad con alto porcentaje de carbono fijo, pero sí, un aumento de la temperatura tiene una mayor significancia en la reducción de los materiales volátiles.

2.3.2. TIEMPO Y VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO EN EL PROCESO DE DESTILACIÓN SECA

La velocidad de calentamiento tiene gran influencia en los rendimientos gravimétricos de los productos y en el contenido de carbono fijo del carbón vegetal (CETEC, citado por Santos *et al.* 2010). Gonzales (2002) señala que la velocidad de calentamiento influye inversamente con el rendimiento de carbón pero directamente con la producción de alquitrán.

Las tasas de calentamiento bajas y moderadas sin evacuación rápida de la fase volátil promueven la formación de material carbonizado, al permitir mayores tiempos de contacto entre la fase volátil y sólida, de esta manera se contribuye a que se presenten reacciones secundarias de recondensación. A medida que se incrementa el tiempo de permanencia de la fase volátil a temperaturas elevadas en el reactor, se presenta la degradación sucesiva de los componentes de esta fase (Gomez y Wolfgang *et al.* 2008).

Cuando la temperatura de destilación seca es baja y el período en el horno es breve, el contenido de sustancia volátil aumenta (FAO 1983). Así también, el rendimiento del carbono fijo tiende a caer cuando la velocidad de calentamiento aumenta (Gomez; citado por Santos *et al.* 2010).

Con respecto a la cantidad de alquitrán insoluble, éste tiene relación directa con la velocidad de calentamiento a una temperatura final del proceso. A mayor velocidad de calentamiento baja el rendimiento de carbón vegetal, induciéndose la conversión del combustible en productos volátiles, además de que tasas elevadas de calentamiento tienden a producir un carbón más friable, debido a la falta de cinética de carbonización, promoviendo fisuras y grietas en el carbón, disminuyendo su densidad verdadera (Pacheco 2005).

2.3.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS DEL MATERIAL VEGETAL

Pacheco (2005) señala que las características de la materia prima que influyen en el proceso de destilación son la densidad, tamaño, humedad y composición química.

Santos *et al.* (2010) indica que la densidad de la madera afecta el rendimiento del proceso obteniéndose mayor peso de carbón vegetal, además una madera densa tiende también a dar un carbón vegetal denso y fuerte. Sin embargo, una madera muy densa produce a veces carbón vegetal quebradizo, puesto que la madera tiende a desmenuzarse durante la carbonización (FAO 1983).

Las mejores propiedades químicas del carbón vegetal obtenido corresponden a mayores niveles de carbono fijo, bajos niveles de sustancias volátiles y cenizas, características asociadas a un alto contenido de lignina. Las maderas con alto contenido de lignina y extractivos producen mayor cantidad de carbón, de mayor densidad y resistencia en términos de propiedades físicas y mecánicas, según lo mencionado por Santos *et al.* (2010) y Dilson (2010).

El mayor contenido de lignina en la materia prima también se asocia a una mayor formación de alquitran (Gomez y Wolfgang *et al.* 2008). Así mismo, Gonzales (2010) afirma que la mayor fracción de breas y alquitranes se obtiene de la holocelusa en la materia prima.

Bravo, citado por Ordaz (2003) y FAO (1983), señalan que un mayor contenido de holocelulosa aumenta la producción de destilados, disminuyendo el rendimiento de carbón y la lignina aumenta la producción de carbón.

Las hemicelulosas son los compuestos responsables de la mayor formación de ácido acético durante la descomposición térmica (Oliveira, citado por Santos *et al.* 2010).

En cuanto al contenido de cenizas Andrade, citado por Santos *et al.* (2010) indica que una mayor proporción de minerales en la madera, generara un mayor porcentaje de cenizas en el carbón. Además, señala que el contenido y la composición química de la cenizas pueden ser afectados por la disponibilidad de minerales en el suelo.

2.3.4. CONTENIDO DE HUMEDAD DEL MATERIAL VEGETAL

Marcos, citado por Rojas (2014), indica que a mayor humedad de la madera es menor el rendimiento de carbón vegetal.

Santos *et al.* (2010) señala que la madera antes de la carbónización precisa ser secada consumiendo gran cantidad de energía, que es proporcionada por la cámara de combustión externa, por ello cuanto más humedad posea la madera mayor será el requerimiento de energía para secarla, reduciendo el poder calorífico del carbón obtenido. Así también, Cotta citado por este mismo autor señala que la fabricación de carbón con madera húmeda origina un carbón vegetal friable y quebradizo, originado por el aumento de la presión de vapor durante la transformación de la madera en carbón, generándose también la elevación de los niveles de finos durante el manipuleo y transporte, recomendando una humedad en base seca entre 20 a 30 por ciento.

2.4. MÉTODOS DE CARBONIZACIÓN Y/O DESTILACIÓN SECA

Los métodos de carbonización más difundidos son la parva tradicional o huayrona, horno de ladrillo y horno metálico (FAO 1983). Sin embargo, la tendencia actual en la producción de carbón vegetal aspira a mejorar los efectos medio ambientales incrementando el rendimiento y calidad de los productos obtenidos. Por ello, se están desarrollando nuevas tecnologías como la destilación seca, usándose hornos tipo retortas (Stassen 2002).

El horno tipo retorta consta de una retorta de hierro cilíndrica con tapa metálica, donde la madera a carbonizar es colocada; posee un horno externo a base de leña para generación de energía. Así mismo, la retorta tiene conectado un conducto de salida por donde son evacuados los gases de combustión condensables y no condensables, y que son conducidos por un serpentín inmerso en un recipiente con agua que circula; en el serpentín ocurre la condensación de los gases condensables formando líquido piroleñoso que es colectado en un recipiente, mientras que los gases no condensables pueden ser liberados o conducidos nuevamente a la cámara de combustión (Azareño 1988).

2.5. PRODUCTOS OBTENIDOS EN EL PROCESO DE DESTILACIÓN SECA

Son tres los productos obtenidos por la destilación seca de materiales lignocelulósicos (Glauco 2010):

- 1) Carbón vegetal;
- 2) Líquidos piroleñosos; que contienen una fracción acuosa denominada ácido piroleñoso y una fracción líquido oleosa de color oscuro que recibe el nombre de alquitran;
- 3) Gases no condensables.

En cuanto a los rendimientos de los productos obtenidos, Sardinha (2002) señala que el de carbón vegetal es 25,0 por ciento; licor piroleñoso 46,5 por ciento y gases no condensables 18,0 por ciento, este último formado por monóxido de carbono, hidrógeno e hidrocarburos.

2.6. DESTILACIÓN SECA DE *GUADUA ANGUSTIFOLIA* KUNTH COMPARADA CON OTROS BAMBUES

En cuanto a los estudios de destilación seca de cañas de *Guadua angustifolia* Kunth Otavio *et al.* (1987) encontro en un estudio de destilación en retorta, realizado a una temperatura máxima de 550 °C, un rendimiento de 32,7 por ciento de carbón vegetal; 37,6 por ciento de licor piroleñoso y 29,6 por ciento de gases no condensables. Del mismo modo Gonzales (2002) en el proceso de destilación en retorta realizado con esta especie, a 500 °C de temperatura máxima y un tiempo de 180 minutos, obtuvo un rendimiento de 32,0 por ciento de carbón vegetal; 22,0 por ciento de rendimiento de licor piroleñoso y 46,0 por ciento de gases no condensables y para *Guadua sarcocarpa* halló rendimientos de 29,0 por ciento de carbón vegetal, 42,0 por ciento de licor piroleñoso y 29,0 por ciento de gases no condensables.

Otras especies de bambú como *Bambusa vulgaris* reportaron 29,6 por ciento de rendimiento de carbón vegetal; 33,0 por ciento de licor piroleñoso y 37,4 por ciento de gases no condensables; así mismo, *Dendrocalamus giganteus* reportó un rendimiento en carbón vegetal de 30,4 por ciento; 25,2 por ciento de licor piroleñoso y 44, 4 por ciento de gases no condensables, según lo señalado por Otavio *et al.* (1987) (Ver Tabla 3).

Tabla 3: Rendimiento de productos obtenidos por destilación seca con diferentes especies de bambú.

<i>Material</i>	<i>Rendimiento de carbón vegetal (%)</i>	<i>Rendimiento de licor piroleñoso (%)</i>	<i>Rendimiento de gases no condensables (%)</i>
<i>Bambusa vulgaris vittata</i>	32,4	33,6	34,0
<i>Bambusa tuldooides</i>	28,5	38,7	32,8
<i>Bambusa vulgaris</i>	29,6	33,0	37,4
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	30,4	25,2	44,4
<i>Guadua angustifolia</i>	32,7	37,6	29,7
Promedio	30,7	33,6	35,7

FUENTE: Otavio *et al.* 1987

3. CARBÓN VEGETAL

El carbón vegetal es un combustible sólido, de color negro, con mayor poder calorífico que la madera, por su mayor contenido de carbono fijo. Es inerte, difícilmente alterable a condiciones atmosféricas normales y no es atacado por agentes biológicos (Sanabria 2007).

3.1. PROPIEDADES

Las propiedades más importantes del carbón vegetal que influyen en su calidad son: humedad, densidad, capacidad calorífica, contenido de cenizas, contenido de volátiles y carbono fijo (FAO 1983).

3.1.1. CONTENIDO DE HUMEDAD

Generalmente es del 1 al 16 por ciento. La humedad desaparece una vez finalizado el proceso de destilación, por lo que esta depende de las condiciones meteorológicas y del tipo de almacenamiento. Si el carbón vegetal no está en contacto directo con el agua o humedad abundante, rara vez alcanzará una humedad superior al cinco por ciento. Para fines industriales se considera deseable que el porcentaje de humedad sea inferior al 4 por ciento (Islas; citado por Rojas 2014).

Pacheco (2005) señala que la humedad es un adulterante que baja el valor calorífico del carbón; las especificaciones de calidad limitan al contenido de humedad a un 15 por ciento máximo del peso total.

3.1.2. CONTENIDO DE CARBONO FIJO

El carbono fijo es definido como la cantidad de carbono presente en el carbón vegetal (Santos *et al.* 2010).

De acuerdo a García, citado por Rojas (2014) el contenido de carbono fijo está directamente relacionado con la cantidad de lignina por ser el componente más resistente a la descomposición térmica y por tanto la que más aporta al carbón e inversamente proporcional a la cantidad de holocelulosa.

El contenido de carbono fijo varía de 50 a 95 por ciento. Cuando el contenido es alto el carbón es más quebradizo y con menor contenido de sustancias volátiles (Pacheco 2005).

3.1.3. MATERIAL VOLATIL

Comprende todos los residuos líquidos y alquitranosos contenidos en el carbón vegetal que no fueron eliminados totalmente durante el proceso de destilación. El contenido de material volátil deja entrever básicamente el tiempo expuesto para su conversión en carbón vegetal, ya que, cuando la temperatura de carbonización es alta y prolongado el tiempo de exposición, el contenido de volátiles es bajo, caso contrario sucede cuando la temperatura es baja y el periodo en el horno es breve (Pérez y Compean, citado por Rojas 2014).

Pacheco (2005) indica que el contenido de material volátil en el carbón vegetal varía de 10 a 40 por ciento y que un buen carbón vegetal tiene cerca de un 30 por ciento de sustancias volátiles, dado que el carbón con mayor cantidad de materiales volátiles enciende fácilmente pero al quemar produce humo; caso contrario, uno con poco material volátil es difícil de encender, tiene una combustión más limpia, pero es más quebradizo.

3.1.4. CONTENIDO DE CENIZAS

Las cenizas corresponden al residuo inorgánico que resta después de la combustión completa del carbón. Son sustancias minerales presentes en la madera original, recogidos como contaminantes del suelo. Este contenido varía entre 0,5 a más del 5,0 por ciento dependiendo de la madera, la cantidad de corteza y los contaminantes de tierra y arena. Un buen carbón tiene aproximadamente un tres por ciento de cenizas (Pacheco 2005).

Marcos citado por Rojas (2014) indica que el contenido de cenizas, es directamente proporcional a la cantidad de materia inorgánica de la madera original y es lo que quedaría si la carga de madera fuera incinerada a peso constante. Las cenizas constan de dos partes: una fracción soluble y una insoluble. La parte insoluble inorgánica, constituida principalmente de sílice, no afecta normalmente a cualquier proceso industrial más que por la pérdida de valor calorífico, en cambio los constituyentes solubles inorgánicos pueden presentar problemas sólo para ciertos procedimientos industriales, en cuyo caso el usuario puede estipular que el carbón vegetal tenga un contenido máximo de cenizas.

3.1.5. PODER CALÓRICO

El poder calorífico viene a ser la cantidad de calorías que un combustible puede producir al quemarse (Rojas 2014). El poder calorífico superior (PCS), no tiene en cuenta el calor necesario para evaporar el agua formada durante la combustión de hidrógeno y la humedad del carbón (Santos *et al.* 2010).

Pacheco (2005) señala que un carbón con muchas sustancias volátiles presenta menor poder calorífico que uno con menos sustancias volátiles y alto contenido fijo de carbono. Los factores que afectan el poder calorífico son el contenido de humedad (a mayor humedad menor es el poder calorífico del carbón obtenido) y la composición química de la madera.

El poder calórico es dependiente de la temperatura de carbonización, según lo señalado por Santos *et al.* (2010), quien en un estudio realizado encontró que el carbón producido a 500 °C tiene un valor calorífico más alto que el producido a 300 °C y 700 °C. Esto debido a que el carbón producido a los 300 °C conserva "materia" con bajo poder calórico (resinas,

alquitrán, etc.) y el producido a 500 °C posee un mayor contenido de carbono fijo y materiales volátiles con alto valor de calorífico. Y a los 700 °C si bien el contenido de carbono fijo es mayor este ya no tiene los volátiles de alto poder calorífico. Por lo que se puede afirmar que existe una correlación positiva entre los niveles de carbono fijo y el poder calorífico y una correlación negativa con el contenido de materiales volátiles (Oliveira; citado por Santos *et al.* 2010).

3.1.6. DENSIDAD APARENTE

La densidad del carbón vegetal es una propiedad física importante, ya que se buscan carbones densos, debido a que con el mismo volumen producen mayor número de calorías en su combustión (Marcos, citado por Ordaz 2003). Para usos siderúrgicos y metalúrgicos esta densidad debe de ser la mayor posible (Pacheco 2005).

Santos *et al.* (2010) señala que la densidad aparente es la medida de la densidad de carbón considerando su porosidad. Siendo los valores medios de densidad aparente de 0,17 g/cm³ a 0,50 g/cm³ (Marcos, citado por Ordaz 2003). El valor de esta densidad depende directamente de la madera de origen; sin embargo, esta puede variar con el estado de las piezas escogidas para carbonización, piezas grandes de carbón vegetal fabricado pueden presentar fisuras internas bastante gruesas, capaces de enmascarar el valor de la densidad aparente (Mendes, citado por Santos *et al.* 2010).

Earl, citado por Ordaz (2003) señala que el carbón vegetal obtenido a baja temperatura suele ser más denso que el que se obtiene a alta temperatura porque las sustancias volátiles disminuyen progresivamente a medida que aumenta la temperatura máxima de carbonización.

3.1.7. USOS Y CALIDAD

El carbón vegetal tiene diversas aplicaciones, ya sea como combustible o como insumo industrial, entre los usos industriales se ve en actividades tales como el secado directo o indirecto de otros productos y en la utilización como combustible interno en la fabricación de cal y de cemento, así como la separación de metales y trabajos de fundición . Es usado también en la pigmentación de tintas de imprenta y pinturas, fuegos artificiales, plásticos, producción de caucho, entre otros (Earl, citado por Pacheco 2005).

Ordaz (2003) señala que el carbón requerido como combustible para uso doméstico debe ser poco denso, fácil de encender y emitir el mínimo de humos posible, pudiendo ser obtenido a bajas temperaturas (350 a 400 °C) dado que su composición química no tiene mucha importancia. Este mismo autor señala que el carbón vegetal en siderurgia puede ser usado como combustible o como reductor, debiendo de presentar bajo contenido de cenizas, bajo contenido de materiales volátiles y tener un mínimo de 80 por ciento de carbono fijo, por lo que el proceso de carbonización debe conducirse a altas temperaturas y de duración larga.

Otro uso del carbón vegetal está relacionado a la generación de energía eléctrica y calor, debiendo ser poco friable, menos de 0,3 g/cm³ de densidad aparente y alto contenido de carbono fijo (75 por ciento). Así mismo, el carbón puede ser activado, mejorando sus propiedades de absorción, y es usado en la decoloración de productos alimenticios, medicinal, desinfectantes, purificación de solventes (Patiño, citado por Ordaz 2003).

FAO (1983) indica que las siguientes características del carbón vegetal son requeridos por la industria metalúrgica brasileña: carbón fijo de 60 a 80 por ciento, cenizas de 3 a 6 por ciento, volátiles de 15 a 26 por ciento, contenido de humedad de 5 a 25 por ciento.

Así mismo, Ordaz (2003) señala que la norma alemana CEN/TC/281-1996 especifica los valores mínimos de calidad aceptados en el continente europeo, señalados a continuación:

- El carbono fijo en el carbón vegetal seco deberá tener un mínimo del 80 por ciento en peso.
- El contenido de cenizas en el carbón vegetal seco no debe exceder más del 5 por ciento.

- El contenido de humedad en el carbón vegetal no deberá exceder más del 8 por ciento.
- Material volátil, no presenta algún contenido mínimo.

3.2. CARBÓN VEGETAL DE BAMBÚ

3.2.1. USOS Y PRODUCTOS

Actualmente el carbón de bambú es materia prima para una amplia gama de productos que se logran vía uso directo o por transformaciones químicas, mecánicas o ambas. Entre los procesos de transformación se encuentran su activación para producir carbón activado, el cual tiene un desempeño considerablemente más eficiente en usos tales como: filtros de gases, filtros de agua, decolorantes de vinos, desodorizantes y otros usos en los que se valore la propiedad de absorción. Otro proceso básico destacado es el briqueteado, que mejora sustancialmente el rol del carbón como combustible (Gonzales *et al.* 2004).

Este carbón también puede ser empleado como aislante para la construcción; en siderurgia sustituyendo al carbón mineral en los altos hornos; en la industria metalúrgica para las aleaciones ferrosas; en la industria química tiene variadas aplicaciones, entre ellas la fabricación de pólvora. También se utiliza para mejorar las estructuras de suelos, como mejorador de las condiciones ambientales y como combustible doméstico e industrial, entre otros usos (Gonzales *et al.* 2004).

En la Figura 8 se observa el listado de alternativas productivas para el carbón de bambú y derivados que han sido desarrollados en países asiáticos.

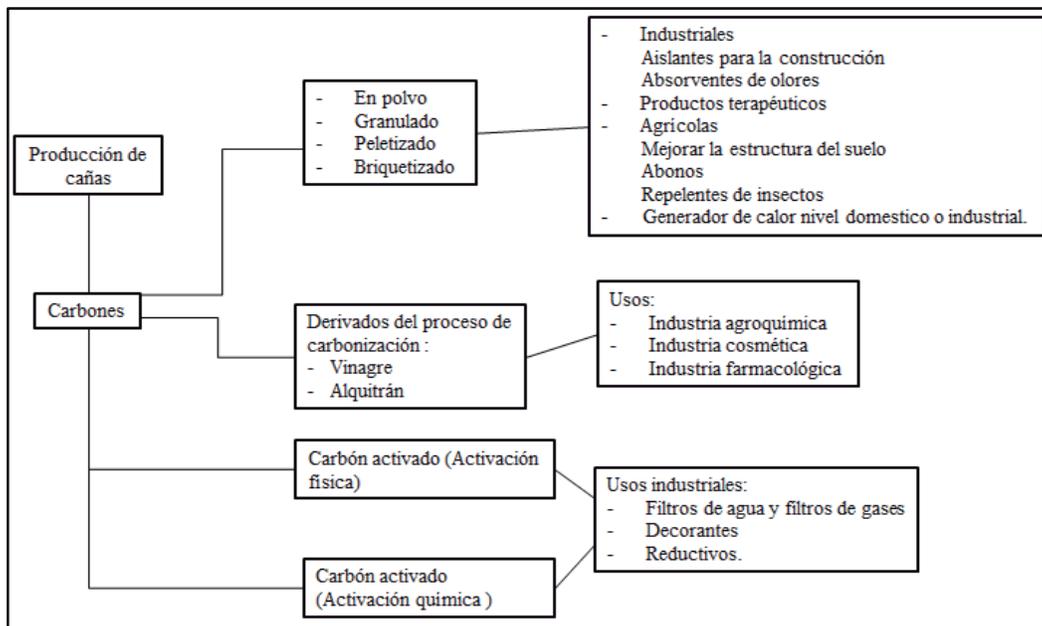


Figura 8: Alternativas productivas para el carbón de bambú y derivados

FUENTE: Boletín del bambú en Chile (2003)

El uso masivo del carbón a nivel rural en países en vías de desarrollo es de tipo doméstico, donde es utilizado para calefacción y preparación de alimentos. En países desarrollados el uso más importante es como mejorador de las condiciones ambientales aprovechando su capacidad de absorción, siendo Corea, Japón y Singapur importantes nichos de mercado (Boletín del bambú en Chile 2003).

3.2.2. PROPIEDADES FÍSICO – QUÍMICAS

Para *Guadua angustifolia*, Otavio *et al.* (1987) en su análisis de carbón vegetal encontró: 0,46 g/cm³ de densidad aparente; 6,30 por ciento de material volátil; 12,30 por ciento de cenizas y 79,30 por ciento de carbono fijo y 6 490 kcal/kg de poder calorífico superior. González (2002) obtuvo un valor de 0,35 g/cm³ de densidad aparente; 6,30 por ciento de material volátil; 27,20 por ciento de cenizas y 66,50 por ciento de carbono fijo. Finalmente, Prías (2011) halló un valor de 86 por ciento de carbono fijo y 13 por ciento de material volátil, en un proceso de destilación seca realizado a 500 °C y 120 minutos.

En la Tabla 4 se muestran algunas de las propiedades físicas – químicas del carbón vegetal de *Guadua angustifolia* comparados con otros bambúes, encontrado por Otavio *et al.* (1987).

Tabla 4: Propiedades físicas- químicas del carbón vegetal de *Guadua angustifolia*, comparado con otras especies de bambúes

<i>Material</i>	<i>Densidad aparente (g/cm³)</i>	<i>Poder calórico superior (kcal/kg)</i>	<i>Cenizas (%)</i>	<i>Carbono fijo (%)</i>
Bambusa vulgaris vittata	0,486	8460	5,1	84,2
Bambusa tuldoides	0,494	7922	3,0	90,4
Bambusa vulgaris	0,418	7785	3,5	86,3
Dendrocalamus giganteus	0,419	8685	5,0	87,7
Guadua angustifolia	0,455	6490	12,3	79,3
Promedio	0,454	7868	5,8	85,6

FUENTE: Otavio et al. 1987

4. LICOR PIROLEÑOSO

4.1. PROPIEDADES Y COMPOSICIÓN QUÍMICA

Si bien las composiciones del carbón y de los gases no condensables son bien conocidas, no es el mismo caso para los vapores piroleñosos donde se pueden encontrar 130 constituyentes en proporciones variables. La condensación total de los vapores piroleñosos genera un líquido parduzco que contiene principalmente: 12 por ciento de ácido acético y fórmico, 3 por ciento de metanol, 20 por ciento de aceites y alquitranes y 65 por ciento de agua. De estas cifras se desprende que la separación y la purificación de los productos son costosas, en particular a causa de las grandes cantidades de agua. La obtención de productos de alto valor añadido representa un futuro en pirolisis, futuro que pasa por mejorar principalmente las técnicas de separación. Además, de la producción de productos químicos de alto valor añadido, los líquidos obtenidos de la pirolisis de madera pueden utilizarse como combustibles líquidos (Arauzo 2002).

La composición y cantidades del licor piroleñoso varían en función de la especie utilizada, representando aproximadamente entre el 35 a 45 por ciento en peso de la madera, pudiendo ser destilado en destiladores de columna permitiendo la separación de varios productos de diferentes puntos de ebullición (Sardinha 2002).

Este licor piroleñoso se separa en dos capas consistentes, alquitrán insoluble y la capa acuosa que contiene los otros productos químicos. Santos *et al.* (2010), señala que la fase acuosa está formada por alcoholes, cetonas y varios compuestos volátiles de bajo peso molecular y la fase viscosa (alquitrán insoluble) está compuesta de agua, fenoles volátiles (creosota de madera) y brea.

Algunos de los elementos constituyentes del licor piroleñoso son definidos a continuación:

4.1.1. ALQUITRANES

El alquitrán de madera es una sustancia líquida bituminosa, viscosa, grasa, oscura y de olor fuerte, que se obtiene de la destilación seca del material lignocelulósico. Usado actualmente en la elaboración de diversos productos, como jabones, cosméticos, pinturas, plásticos y productos químicos. También se utiliza como aditivo en alimentos y es usado como combustible (Agudo 2009).

El alquitrán contiene creosota, guayacol, fenoles y éteres de fenol (Fenger, citado por Sardinha 2002).

4.1.2. METANOL

El metanol es un alcohol, líquido, incoloro, neutro, polar e inflamable. Es miscible en agua, alcoholes, ésteres y con la mayoría de los solventes orgánicos. Es poco soluble en grasas y aceites. Se usa como base de productos químicos, entre otros usos como líquido limpia parabrizas, anticongelante y combustible. Su punto de ebullición es de 64,6 °C (Methanex 2006).

4.1.3. ÁCIDO ACÉTICO

Es un líquido incoloro, de olor fuerte similar al vinagre. Usado para fabricar medicamentos, tintura, plásticos y aditivos para los alimentos e insecticidas (Departamento de salud de New Jersey 2007).

4.2. USOS

Este vinagre de madera o ácido piroleñoso generalmente de color marrón oscuro, viscoso y compuesto de una mezcla muy compleja de hidrocarburos oxigenados. Es útil para la mejora del suelo, latencia de la semilla, germinación y especialmente en la actividad biológica de los hongos y ataque de termitas (Ratanapisit 2009).

El alquitrán tiene varios usos industriales y medicinales. El hidrógeno y los hidrocarburos producidos en el proceso de destilación seca de la madera pueden ser recuperados y utilizados como combustible (Sardinha 2002).

4.3. LICOR PIROLEÑOSO DE BAMBÚ

4.3.1. USOS Y PRODUCTOS

Mejia (2011) afirma que el vinagre de *Guadua angustifolia* Kunth tiene potencial para desarrollar diversos productos farmacéuticos y alimentarios, siendo los componentes más importantes el ácido acético, el guayacol, el p-cresol, el siringol, entre otros; principales causantes del olor característico a ahumado y medicinal.

A los extractos en medio ácido del vinagre de bambú se les atribuye una importante acción anti microbiana, relacionada con la presencia de ácido acético en su composición; a la fracción fenólica se le reconoce una alta cantidad de compuestos antioxidantes y promisorios para el desarrollo de productos antisépticos. Otros componentes orgánicos

dentro del vinagre de bambú desempeñan un papel importante en el uso práctico de este, incluso cuando se presentan en cantidades de trazas (Jum, citado por Mejía 2011).

4.3.2. PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS

El vinagre de bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) después de refinar, es un líquido ligeramente amarillo o transparente, con leve olor a quemado, con densidad de 1,001 a 1,008 g/cm³, pH entre 2,6 y 3,2, con 7,5 a 10,0 por ciento de contenido de ácido acético, menos de 0,01 por ciento de alcohol metílico y fenol, de 0,5 a 2,0 por ciento de aceites o alquitran. Se estima que tiene entre 80 a 200 componentes, de los cuales 32 por ciento corresponden a ácidos orgánicos, 40 por ciento a compuestos fenólicos, tres por ciento a aldehídos, cinco por ciento a alcoholes, cuatro por ciento a compuestos de éster y 10 por ciento a otros componentes. La acidez expresada en porcentaje por peso de ácido acético está en un rango de 2,5 a 3,5 por ciento (Mejía 2011).

Gonzales (2002) encontró 2,3 por ciento de alquitrán insoluble; 3,7 por ciento de alquitrán soluble; 9,7 por ciento de mezcla metanol acetona; 3 por ciento de ácido acético; 81,3 por ciento de otros compuestos (principalmente agua) al analizar el licor piroleñoso de *Guadua angustifolia* Kunth obtenido de un proceso de destilación seca en retorta.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. LUGAR DE COLECCIÓN

La colección de muestras de caña de *Guadua angustifolia* Kunth se realizó en una parcela manejada de producción actual, ubicada en el sector de Limoncito, distrito de La Florida, provincia de San Miguel, departamento de Cajamarca (Ver Figura 9 y 10) . Se seleccionaron en total de forma aleatoria seis cañas o culmos de cuatro años de edad (estado maduro).

En la Figura 9 y Tabla 5 se presenta la localización geográfica y las coordenadas UTM de la parcela de colección.

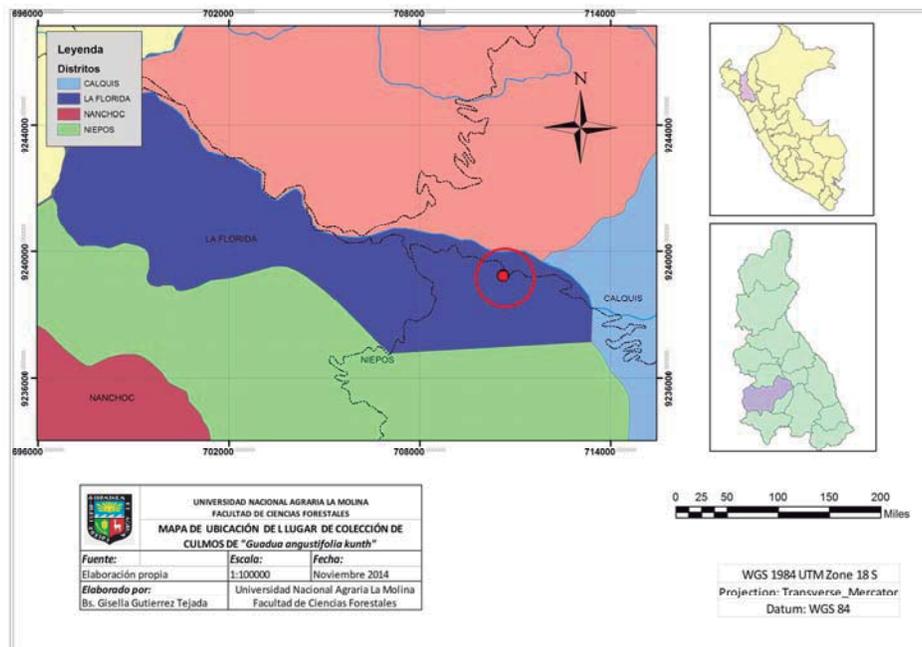


Figura 9: Mapa de ubicación geográfica del lugar de colección

FUENTE: Elaboración propia.

Tabla 5: Coordenadas UTM del lugar de colección de la caña.

<i>Punto de georeferenciación</i>	<i>Coordenadas UTM (WGS84)</i>	<i>Altitud (msnm)</i>
1	17 M 710622 9239235	1347
2	17 M 710623 9239235	1348
3	17 M 710634 9239243	1354
4	17 M 710633 9239254	1348
5	17 M 710619 9239251	1349
6	17 M 710609 9239248	1360

FUENTE: Elaboración propia

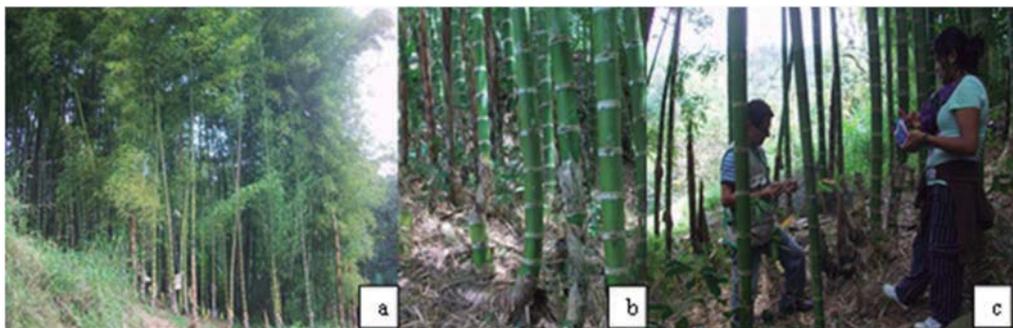


Figura 10: Parcela de colección de muestras en La Florida – Cajamarca

FUENTE: Elaboración propia

Dónde:

- a) Vista panorámica de la parcela
- b) Culmos de *Guadua angustifolia* dentro de la parcela
- c) Marcado de culmos seleccionados

2. LUGAR DE ANÁLISIS

El presente trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de Pulpa y Papel del área de Transformación Química de la Madera del Departamento Académico de Industrias Forestales en la Facultad de Ciencias Forestales en la Universidad Nacional Agraria La Molina.

3. MATERIALES Y EQUIPOS

3.1. MATERIA PRIMA

Luego de ser extraídas las cañas, fueron trasladadas a otro lugar fuera de la parcela, donde se realizó la perforación vertical de los entrenudos con ayuda de un fierro de ½” con el fin de favorecer la evacuación de la savia y la pérdida de humedad de la caña. Posteriormente, las cañas fueron apiladas verticalmente por un periodo de 10 días, luego del cual se separaron los primeros dos metros de caña y se tomó como materia prima los siguientes seis metros del material correspondientes a la cepa y basa (Ver Figuras 11 y 12); colectándose en total seis cañas de *Guadua angustifolia* Kunth de seis metros cada una.

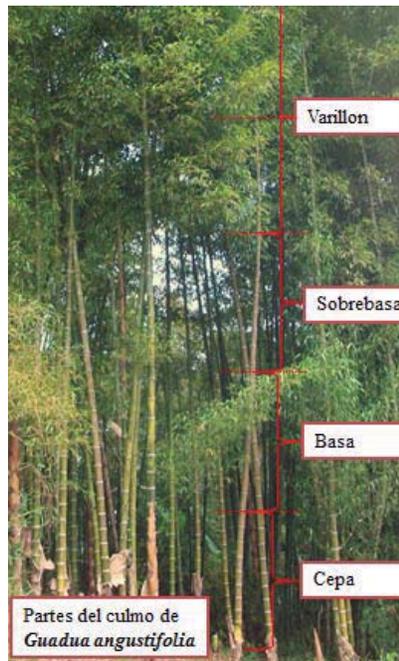


Figura 11: Partes comerciales del culmo de *Guadua angustifolia*

FUENTE: Elaboración propia

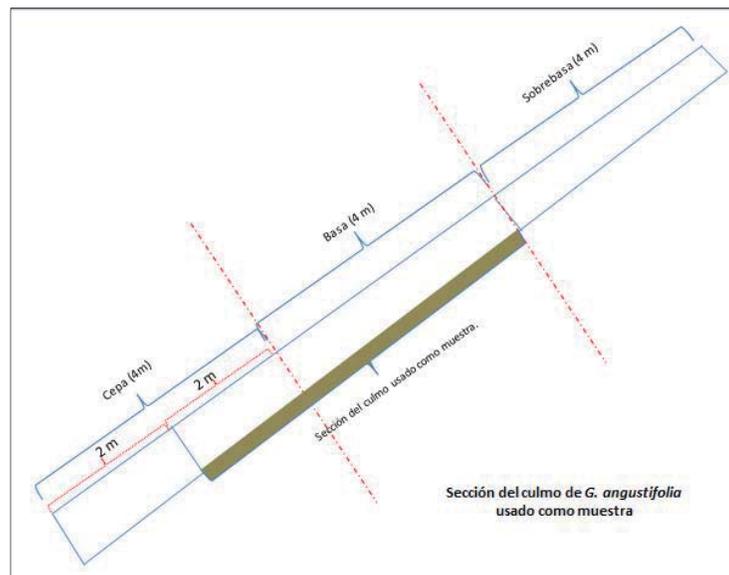


Figura 12: Sección del culmo de *Guadua angustifolia* usado como muestra.

FUENTE: Elaboración propia.

Posteriormente cada caña de 6 metros fue redimensionada a un metro de longitud obteniéndose en total 36 secciones, las cuales fueron embaladas en costalillos para su traslado al laboratorio. Las cañas seccionadas incluyeron los nudos y diafragmas del culmo.



Figura 13: Procesamiento de las muestras de caña colectadas

FUENTE: Elaboración propia

Dónde:

- a) Redimensionamiento de las muestras de caña colectadas
- b) Marcado de cañas para embalaje
- c) Embalaje de las muestras para su transporte a Lima

3.2. MATERIALES E INSTRUMENTOS

- Cronómetro, precisión ± 0.1 s
- Crisoles de porcelana con tapa de 50 mL
- Espátulas
- Materiales de vidrio: vaguetas, buretas 100 mL, embudos, pipetas de 5 y 10 mL, probetas 50 y 100 mL, vasos de precipitado 100 y 250 mL.
- Termómetro de reloj hasta 500 °C
- Papel filtro, de filtrado lento y rápido.
- Termómetro radial 500 °C
- Mortero
- Bolsas con cierre hermético, marca Ziploc
- Pinzas de metal y guantes aislantes de cuerpo
- Desecadores de silicagel
- Tamices de mallas ASTM de 40 y 60 mesh
- Estufa para secado 105 °C, marca “Heraeus”
- Mufla eléctrica a temperatura máxima de 1000 °C “Thermolyne 48000” modelo NF1630
- Campana de vidrio; con desecador de silicagel
- Termómetro eléctrico de temperatura máxima 1200 °C
- Molino de grano

- Balanza analítica plus, marca “Ohaus”, de 220 V, capacidad 200 g, precisión 0,1 mg
- Balanza portátil estándar, marca “Ohaus” LS 200, 12v., capacidad de 200 g, con una precisión de 0,1g
- Balanza digital de 5 kg de capacidad
- pH-metro portátil
- Planchas de calentamiento

3.3. EQUIPOS

- Equipo de destilación seca, de 5 kg de capacidad, con calentamiento externo; incluye retorta de carbonización, condensador y trampa de gases.

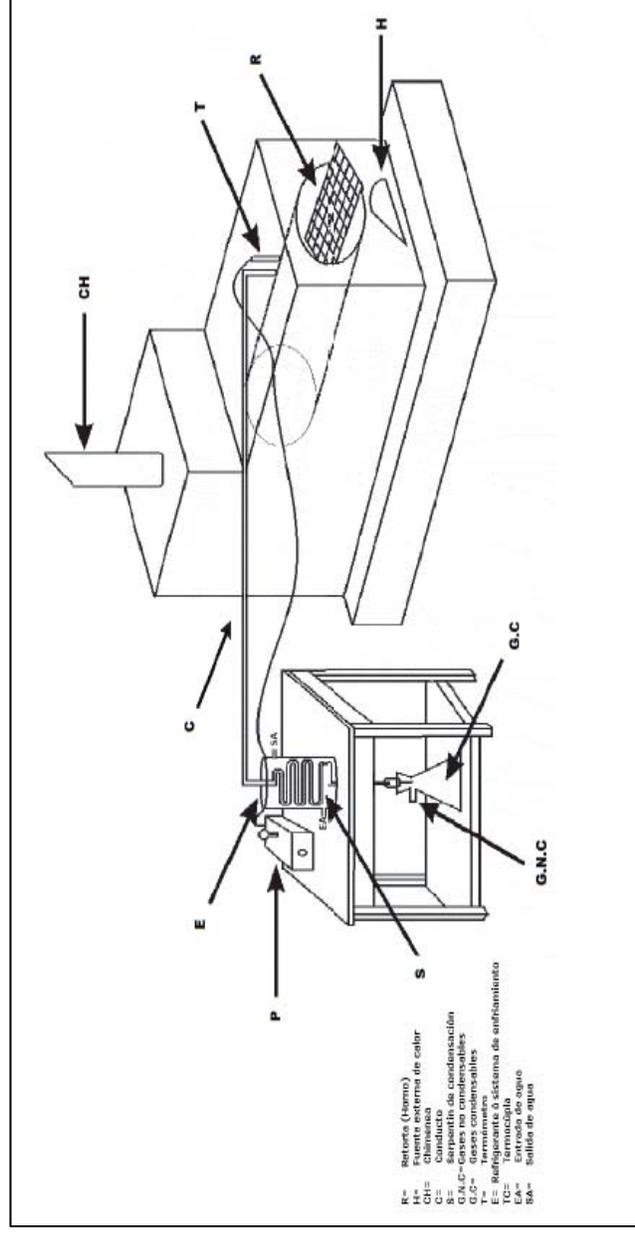


Figura 14: Esquema del equipo de destilación seca por el método de retorta

Fuente: Rocha 2008

- Equipo de destilación fraccionada, de vidrio, de 1L de capacidad.

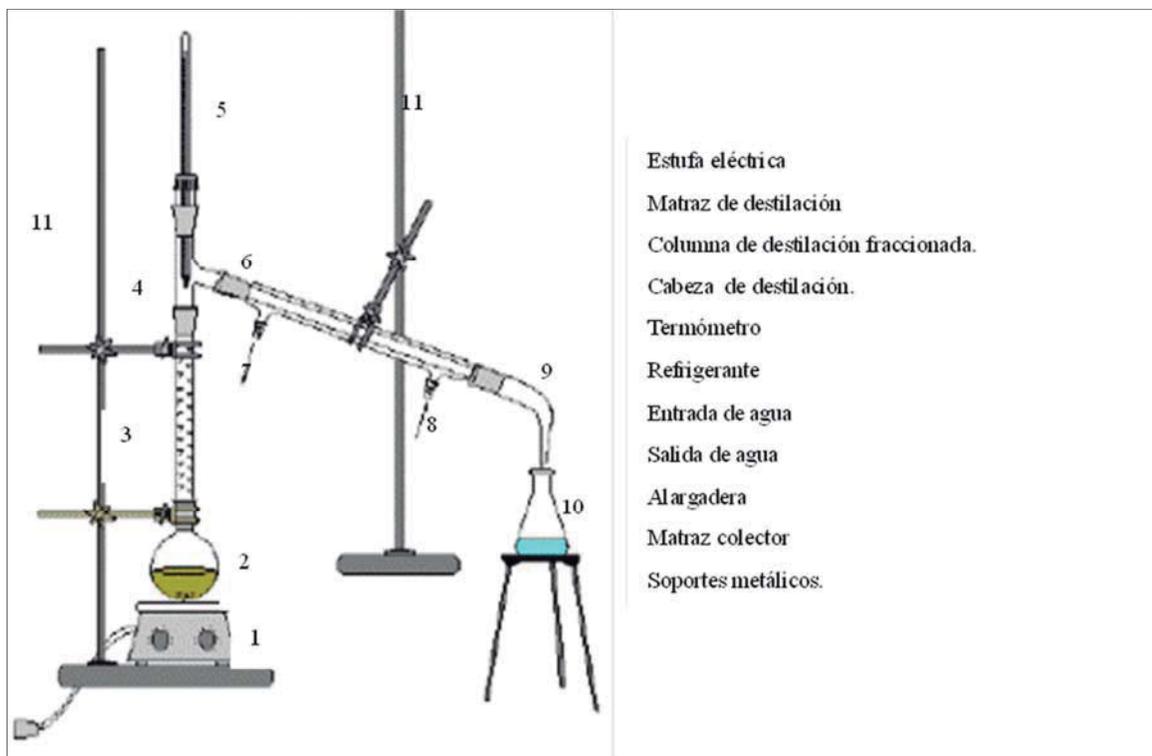


Figura 15: Equipo de destilación fraccionada.

FUENTE: Elaboración propia

4. METODOLOGÍA

4.1. ACONDICIONAMIENTO DE LA MATERIA PRIMA

Para el acondicionamiento de la materia prima, las cañas de un metro de longitud se volvieron a redimensionar a una longitud de 25 centímetros, incluyendo nudos (obteniéndose en total 144 secciones de caña de 25 centímetros cada una); con una sierra eléctrica. Así mismo, se almacenó el aserrín generado en el corte de las cañas en una bolsa con cierre hermético para su posterior evaluación y caracterización química.

Posteriormente, las secciones de caña de 25 centímetros de longitud fueron secadas al aire, bajo sombra y con un almacenamiento que permitió la circulación de aire, siendo movidas periódicamente a fin de lograr un secado uniforme y evitar la proliferación de hongos.

Las muestras fueron secadas hasta alcanzar un contenido de humedad menor a 20 por ciento en base materia húmeda (% bmh), cuya determinación fue realizada por el método gravimétrico; por el cual una muestra de caña húmeda, pesada previamente, es llevada a estufa a una temperatura promedio de ± 105 °C hasta alcanzar peso constante, calculándose el contenido de humedad promedio según la siguiente fórmula:

$$\text{Contenido de humedad de la muestra} = \frac{(\text{Peso húmedo de muestra} - \text{Peso seco de muestra})}{\text{Peso seco de la muestra}}$$

4.2. DESTILACIÓN SECA EN RETORTA

Previamente a la destilación seca, se calculó la masa seca (ms) de 2 kg de caña a partir de las secciones de 25 centímetros preparadas anteriormente, para ello se determinó el contenido de humedad de cada una de las secciones cuya sumatoria en masa seca sumo aproximadamente los dos kilogramos correspondientes a la muestra (aproximadamente cinco secciones). Estas secciones de caña fueron seleccionadas según diámetro, teniéndose en promedio por muestra: una sección de caña de entre 11 y 12 centímetros de diámetro, dos secciones de caña de entre 9 y 11 centímetros de diámetro y dos secciones de caña de entre 7 y 9 centímetros de diámetro.

La muestra preparada fue colocada dentro de una retorta metálica y cilíndrica (Ver Figura 16), siendo sometida a calentamiento externo hasta alcanzar la temperatura y tiempo requerido para cada experimento, según diseño. Durante este proceso se controló el tiempo y temperatura de destilación cada 5 minutos con la finalidad de conocer la tasa o velocidad de calentamiento del proceso.

Durante el tiempo de destilación, los gases generados por la descomposición térmica de las cañas fueron conducidos a través de una abertura ubicada en la parte superior de la retorta a un serpentín de condensación, con línea de entrada y salida de agua en contracorriente. En la parte inferior del condensador se colocó un recipiente, previamente pesado, para recibir los condensados (licor piroleñoso) proveniente de la destilación seca de la muestra (Ver Figura 16).



Figura 16: Equipo de destilación seca en retorta metálica usado en el estudio.

FUENTE: Elaboración propia

Terminado el tiempo de destilación seca se pesó el recipiente que contenía el licor piroleñoso para evaluar su rendimiento, según la siguiente formula (Gonzales 2002):

$$Rlp (\%) = (lp/ms) \times 100$$

Dónde:

Rlp %: rendimiento de licor piroleñoso

lp: masa de licor piroleñoso al 100 por ciento

ms: masa seca de caña de bambú

Luego se esperó 24 horas para que la retorta enfríe y se realice la descarga de carbón vegetal (Ver Figura 17).

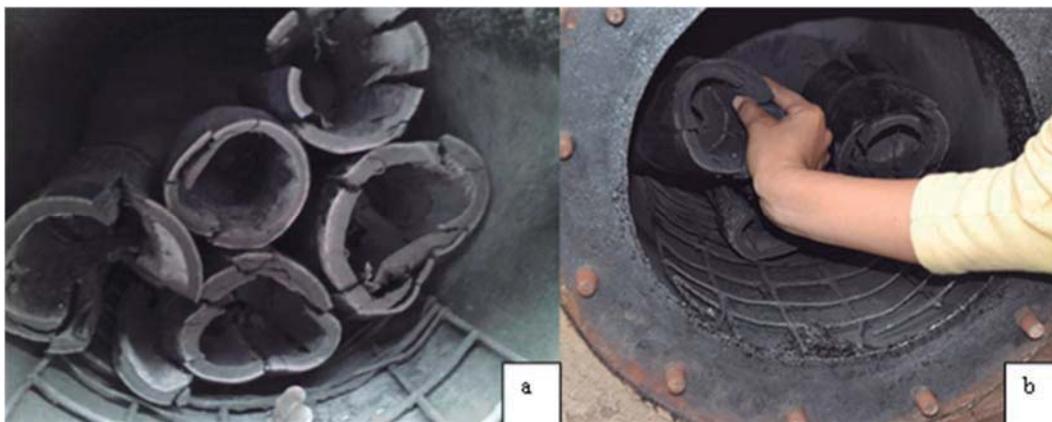


Figura 17: Retorta metálica usada en la destilación seca

FUENTE: Elaboración propia

Dónde:

- a) Muestras carbonizadas en la retorta, luego del proceso de destilación seca
- b) Descarga del carbón vegetal de la retorta metálica

Finalmente, las muestras de carbón extraídas de la retorta fueron pesadas, determinándose su contenido de humedad por el método gravimétrico (secado en estufa a 105°C, hasta peso constante); este valor de humedad fue utilizado para calcular la masa seca de carbón obtenido (cs) y su rendimiento (Rc%), calculado mediante la siguiente fórmula (Gonzales 2002):

$$Rc (\%) = (cs/ms) \times 100$$

Dónde:

Rc(%): rendimiento de carbón vegetal

cs (g) : masa de carbón seco

ms (g) : masa seca de caña de bambú



Figura 18: Cálculo del peso de carbón vegetal de bambú

FUENTE: Elaboración propia.

Dónde:

- a) Muestras de carbón carbonizadas
- b) Pesado de muestras al salir de la retorta

El rendimiento de los gases no condensables fue obtenido por diferencia de 100, restandole los rendimientos de carbón vegetal y de licor piroleñoso (Gonzales 2002):

$$R_{gnc} (\%) = 100 - (R_c \% + R_{lp} \%)$$

Donde:

$R_{gnc} (\%)$: rendimiento de gases no condensables

$R_c \%$: rendimiento de carbón vegetal

$R_{lp} \%$: rendimiento de licor piroleñoso

4.3. MOLIENDA Y TAMIZADO DE CARBÓN OBTENIDO

Luego de la destilación seca, el carbón vegetal fue molido con un mortero para reducir su tamaño. Posteriormente, se tamizó por las mallas 40/60 ASTM como paso previo a la realización de los ensayos (Ver Figura 19).

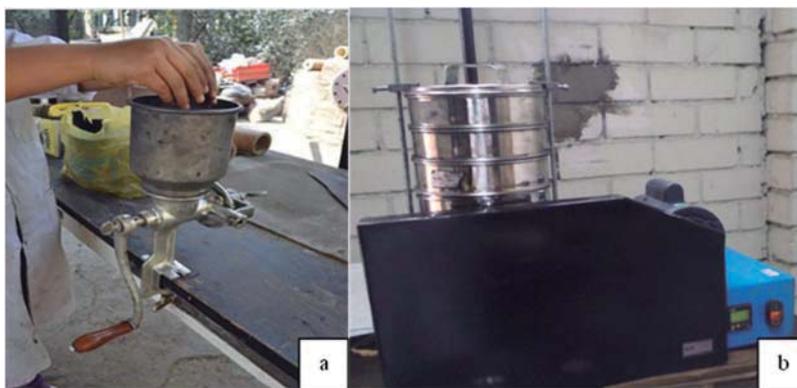


Figura 19: Molienda y tamizado del carbón vegetal

FUENTE: Elaboración propia

Dónde:

- a) Molienda de carbón vegetal
- b) Tamizado de carbón vegetal

4.4. EVALUACIÓN DE MATERIA PRIMA Y PRODUCTOS

4.4.1. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL CULMO

Las evaluaciones realizadas a la materia prima, culmo de bambú, fueron las siguientes:

- **Contenido de humedad (% bmh):** según norma ASTM D.1762
- **Extractivos (%):** según norma TAPPI T6 os-59
- **Holocelulosa (%):** se empleó el Método Jayme –Wise
- **Lignina (%):** se usó el método Klason, según norma TAPPI T222 om-88
- **Cenizas (%):** según norma ASTM D- 1762
- **Composición química de cenizas:** Con las cenizas obtenidas en la mufla, se preparó una solución utilizando cinco mililitros de HCl por muestra, para su posterior evaluación por el método de absorción atómica (Bazán 1996).
- **Sílice (%):** En un crisol de porcelana con las cenizas, se agregó 10 mL de HCl 4 N tratando de mojar todas las partículas adheridas a las paredes, luego se hirvió el crisol con la muestra por dos minutos posteriormente fue llevado a sequedad a baño maría. Luego, se enfrió en el desecador, agregando 10 mL de H₂O, volviendo a desecar en estufa y agregando 10 mL de HCl 1N dejando la cápsula durante 10 minutos en baño maría; posteriormente se filtró al vacío con papel de filtro compacto sin cenizas y lavando con HCl al uno por ciento. Finalmente, se desecó

el filtro en estufa y se calcinó a 500 °C, pesando el residuo insoluble. Se realizaron tres repeticiones, calculando el porcentaje de sílice con la siguiente fórmula:

$$\text{Sílice (\%)} = \frac{\text{masa de sílice}}{\text{masa seca de la muestra de ceniza}} * 100$$

- **Densidad aparente (g/cm³):** Esta evaluación fue realizada por el principio de Arquímedes, en el cual una sección de culmo entero de peso conocido fue sumergida en un vaso con agua, previamente tarado; anotándose la diferencia de masas, representando está al volumen de la muestra de caña sumergida.

$$D_a = m/v$$

Dónde:

Da: densidad aparente de caña de bambú (g/cm³)

m: masa (g)

v: volumen (cm³)

4.4.2. EVALUACIÓN DEL CARBÓN VEGETAL

Se realizaron las siguientes evaluaciones:

- **Contenido de humedad (Ch) :** según la norma ASTM D-1762
- **Materia volátil (Mv) y Cenizas (Cz):** según la norma ASTM D-1762



Figura 20: Ensayo de material volátil

FUENTE: Elaboración propia.

Dónde:

- a) Crisoles con muestras de carbón vegetal
- b) Mufla eléctrica usada para el ensayo de material volátil

- **Carbono fijo (Cf):** Se determino mediante la siguiente formula (ASTM D-1762):

$$\% Cf = 100 - (\% Mv + \% Cz)$$

Donde:

% Cf: porcentaje de carbono fijo

% Mv: porcentaje de material volátil

% Cz: porcentaje de contenido de cenizas



Figura 21: Ensayo de cenizas

FUENTE: Elaboración propia.

Dónde:

- a) Crisoles con ceniza en desecador
- b) Cenizas obtenidas del culmo

- **Densidad aparente de carbón vegetal entero (g/cm³):** Esta evaluación se realizó empleando probetas de carbón vegetal de 1,0 x 0,5 x 0,5 cm, las cuales fueron pesadas en una balanza analítica y su volumen fue determinado conforme al principio de Arquímedes con el empleo de una probeta graduada; siendo el volumen del carbón correspondiente al volumen de agua desplazado en la probeta (cm³). Finalmente se determinó densidad aparente con la formula siguiente:

$$Da_{cve} = \frac{mc}{vpc}$$

Dónde:

Da cve: densidad aparente de carbón vegetal entero (g/cm³)

mc: masa de carbón (g)

vpc: volumen de probeta de carbón (cm³)

- **Densidad aparente del carbón vegetal molido (Da cvm) (g/cm³):** Para su determinación se pesó la cantidad de carbón vegetal existente en una probeta de volumen conocido.
- **Poder calórico (Pc) :** Se determinó por el método de bomba calorimétrica; según la norma ASTM D-2015-66 (1972), para lo cual las muestras fueron enviadas para su análisis por servicio en el Instituto Nacional de investigación nutricional (ININ). Los resultados obtenidos de poder calórico inferior (PCI), corresponden a una muestra de carbón con un determinado valor de humedad (h).

El poder calórico superior (Pcs) de la muestra sin humedad, se calculó a partir de la fórmula de la FAO (2004), en sistema métrico (kcal/kg), cuya fórmula se presenta a continuación:

$$Pcs = [100 * (Pci h + 6h)] / [100 - h] \text{ (kcal/kg)}$$

Dónde:

Pcs: poder calórico superior (kcal/kg)

Pci h: poder calórico inferior, con humedad h

h: humedad de la muestra, valor porcentual

4.4.3. EVALUACIÓN DE LICOR PIROLEÑOSO

Con el licor piroleñoso se efectuaron los siguientes análisis:

- **Alquitrán insoluble:** hallado por filtración de todo el licor piroleñoso en un papel de filtración rápida (Wathman # 4). La masa del alquitrán insoluble (mai) fue referida a la masa del licor piroleñoso para obtener el rendimiento de alquitrán insoluble (Rai %) (Gonzales 2002) :

Donde:

$$\text{Rai \%} = (\text{mai/lp}) \times 100$$

Rai: Rendim:

mai: masa de alquitrán insoluble filtrado (g)

lp: masa de licor piroleñoso al 100 % (g)

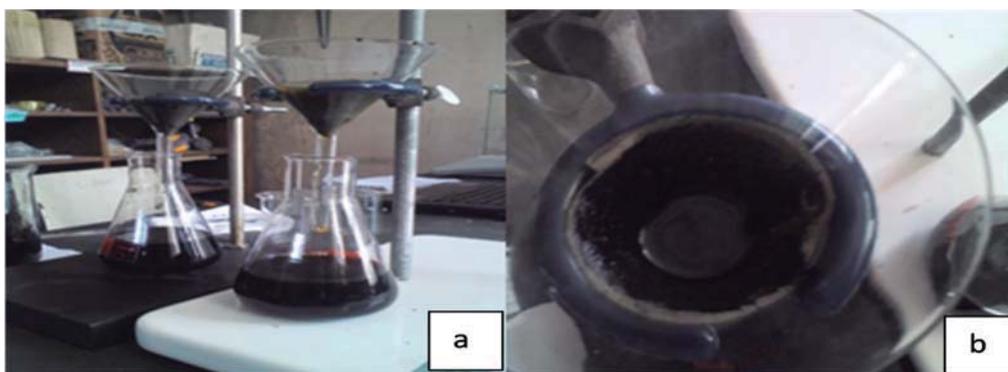


Figura 22: Ensayo de alquitrán insoluble

FUENTE: Elaboración propia.

Dónde:

- a) Filtrado de licor piroleñoso para obtención de alquitrán insoluble
- b) Embudo conteniendo los restos de alquitrán

- **Mezcla Acetona-Metanol:** Del filtrado obtenido del análisis anterior, se tomó una muestra de 100 mL y se llevo a destilación fraccionada, a temperatura de destilación de entre 60 a 70 °C, para facilitar la salida por evaporación de la acetona (temperatura de ebullición= 58 °C) y del metanol (temperatura de ebullición =67 °C). El tiempo de destilación promedio fue de 90 minutos. Se determinó el volumen de mezcla acetona-metanol obtenida, para la obtención del rendimiento de mezcla acetona-metanol en porcentaje volumen/ masa (Ram %):

$$\text{Ram \%} = (\text{mam}/\text{lp}) \times 100$$

Donde:

Ram: porcentaje de acetona – metanol (%)

vam: volumen de acetona – metanol (ml)

lp: masa de licor piroleñoso al 100% (g)



Figura 23: Columna de destilación fraccionada para obtención de acetona-metanol

FUENTE: Elaboración propia.

- **Alquitrán soluble:** Del análisis anterior, se obtuvo el residuo del destilado (fracción no destilada) por evaporación. Luego, se calculó la masa seca del alquitrán soluble (mas) y con ello el rendimiento de alquitrán soluble (Ras %) (Gonzales 2002):

$$\text{Ras \%} = (\text{mas}/\text{lp}) \times 100$$

Donde:

Ras: Rendimiento de alquitran soluble (%)

mas: masa de alquitran soluble (g)

lp: masa de licor piroleñoso al 100% (g)



Figura 24: Ensayo de alquitrán insoluble en licor piroleñoso

FUENTE: Elaboración propia.

Dónde:

- a) Calentamiento de licor piroleñoso libre de alquitrán insoluble
- b) Alquitrán soluble en matraces luego del ensayo

- **Ácido acético:** Del filtrado obtenido luego de hallar el porcentaje de alquitran insoluble, se tomó una muestra de 1 mL y fue llevado a dilución en una fiola de 0,5 L. Luego, de la dilución se separó una muestra de 100 mL y se valoró el ácido acético por titulación ácido-base usando hidroxido de sodio (NaOH) 0.01N y la fórmula de relación de equivalentes ($V \times N = V' \times N'$). Finalmente, se determinó la masa de ácido acético (mac) la cual fue referida a la masa total de licor piroleñoso, para hallar su rendimiento (Rac %) mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Rac.\%} = (\text{mac}/\text{lp}) \times 100$$

Donde:

Rac % : rendimiento de ácido acético (%)

mac: masa de ácido acético (g)

lp: masa de licor piroleñoso al 100 % (g)

En la figura 25 se presenta el diagrama de flujo de la metodología aplicada en el proceso de destilación seca para la obtención de carbón vegetal y licor piroleñoso.

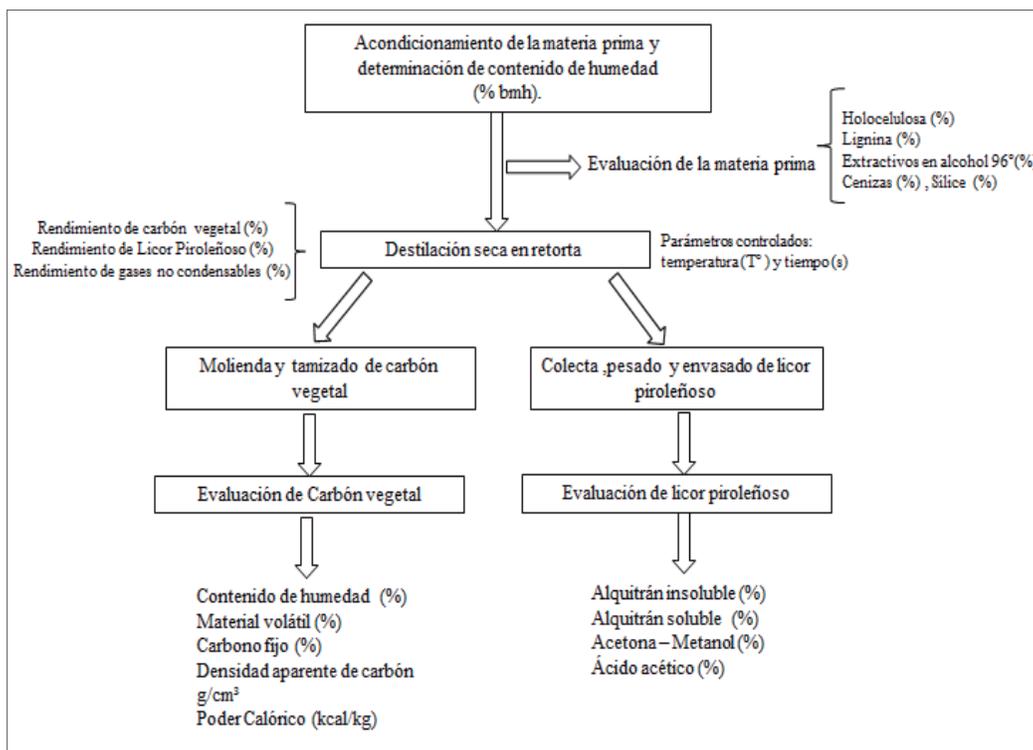


Figura 25: Diagrama de flujo de la metodología aplicada en el proceso de destilación seca para la obtención de carbón vegetal y licor piroleñoso.

FUENTE: Elaboración propia.

5. DISEÑO EXPERIMENTAL

En la presente investigación el arreglo de los tratamientos se realizó bajo un diseño completamente al azar (DCA) en arreglo factorial 2 x 2 con tres repeticiones por experimento, con las variables que se mencionan a continuación, desarrollándose un análisis de experimentos repetidos. En la Tabla 6 se presenta el diseño experimental del estudio realizado.

Tabla 6: Diseño experimental del estudio

Temperatura (T °C)	Tiempo (min)	Tratamientos	Repeticiones	Análisis del proceso de destilación seca		Análisis del carbón vegetal							Análisis del licor piroleñoso								
				Rc (%)	Rip (%)	Ch %	Mv %	Cz %	CF %	Da cve (g/cm ³)	Da cvm (g/cm ³)	Pc s (kJ/kg)	Rai (%)	Ras (%)	Ram (%)	Rac (%)					
450	120	T45 t12	T45 t12 I	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
			T45 t12 II	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
			T45 t12 III	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	150	T45 t15	T45 t15 I	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
			T45 t15 II	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
			T45 t15 III	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
500	120	T50 t12	T50 t12 I	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
			T50 t12 II	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
			T50 t12 III	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	150	T50 t15	T50 t15 I	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
			T50 t15 II	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
			T50 t15 III	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

FUENTE: *Elaboración propia.*

Número de experimentos: dos temperaturas de carbonización * dos tiempos totales en T° máxima * tres repeticiones de cada tratamiento.

En la presente investigación el arreglo de los tratamientos se realizó bajo un diseño completamente al azar (DCA) en arreglo factorial 2 x 2 con tres repeticiones por experimento, con las variables que se mencionan a continuación, desarrollándose un análisis de experimentos repetidos. En la Tabla 6 se presenta el diseño experimental del estudio realizado.

Donde:

Variables independientes

- Temperatura máxima de destilación (T° max)
- Tiempo de destilación a temperatura máxima (t)

Variables Dependientes

- Rendimiento de carbón vegetal (Rc %)
- Rendimiento de licor piroleñoso (Rlp %)
- Rendimiento de gases no condensables (Rgnc %)
- Porcentaje de material volátil (Mv %)
- Porcentaje de cenizas (Cz %)
- Porcentaje de carbono fijo (Cf %)
- Densidad aparente de carbón entero (Da cve %)
- Densidad aparente de carbón molido (Da cvm %)
- Poder calórico superior de carbón vegetal (Pcs %)
- Rendimiento de alquitrán insoluble (Rai %)

- Rendimiento de alquitrán soluble (Ras %)
- Rendimiento de mezcla acetona-metanol (Ram %)
- Rendimiento de ácido acético (Rac %)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. DEL ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA

Los resultados obtenidos de la evaluación de la composición química realizada a la materia prima se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Comparación de los resultados de análisis de composición química de la materia prima*, con otros estudios realizados

	<i>Lignina</i> (%)	<i>Holocelulosa</i> ** (%)	<i>Extractivos</i> (%)	<i>Cenizas</i> (%)	<i>Sílice en cenizas</i> (%)
ESTUDIO					
<i>Guadua angustifolia</i>	24,07	68,30	7,54 (en etanol al 96 %)	4,94	2,94
OTROS ESTUDIOS					
<i>Guadua angustifolia</i>					
Azini y Salgado (1992)	20,60	60,40	19,00 (totales)		
Cuellar (2009)	21,88	58,80	6,47 (etanol)	3,80	
Chuluiza (2009)	19,72	71,42		5,16	
Gonzales (2002)	22,70	71,16	0,89 (alcohol benceno)	5,85	4,29
Otavio (1987)	20,60	60,40	19,00 (totales)		
Arrabal y Montoya (2013).			16,10 (acetona) y 11,60 (agua)		
Promedio bambú *					
Otavio <i>et. al.</i> (1987)	20,10	64,60	15, 20 (totales)		

*base materia prima a sequedad absoluta; **Celulosa + hemicelulosas

FUENTE: Elaboración propia

Respecto al porcentaje de holocelulosa en la materia prima (Ver Tabla 7), se encontró un contenido promedio de 68,30 por ciento, valores mayores a los encontrados por Salgado y Azini (1992), Cuellar (2009) y Otavio *et al.* (1987) y similares a los resultados obtenidos por

Chiluiza (2009) y Gonzales (2002) en estudios realizados para esta misma especie. Así mismo, el contenido de holocelulosa obtenido se encuentra sobre el valor promedio encontrado en el bambú (64,60 por ciento) por Otavio *et al.* (1987) , al evaluar diferentes especies como: *Bambusa vulgaris*, *Bambusa tuldoides*, *Dendrocalamus giganteus* y *Guadua angustifolia*.

Otro componente químico de gran importancia en la destilación seca es la lignina, cuyo contenido promedio fue de 24,07 por ciento, valor mayor al encontrado por Salgado y Azini (1992), Cuellar (2009), Chiluiza (2009) y Gonzales (2002) en los estudios realizados para la misma especie, inclusive mayor al promedio encontrado para el bambú por Otavio *et al.* (1987), al comparar diferentes especies de bambúes (Ver Tabla 7).

Según lo señalado por Liese y Kumar (2003), otros componentes químicos del culmo de *Guadua angustifolia* que se encuentran en menores proporciones son los extractivos y cenizas. En el análisis realizado se encontró un contenido de extractivos de 7,54 por ciento, valor mayor al encontrado por Cuellar (2009) y menor al encontrado por Arrabal y Montoya (2013) en estudios realizados con solventes similares, para esta misma especie (Ver Tabla 7). Además, según lo indicado por Li, citado por Chiluiza (2009), los compuestos que estarían formando parte de estos extractivos son resinas, ceras, grasas y gomas; por este motivo es importante indicar que el porcentaje hallado varía de acuerdo al solvente utilizado para su extracción, por la diferente naturaleza que estos poseen (polares y no polares).

Del análisis de cenizas se encontró un valor promedio de 4,94 por ciento de cenizas en el culmo, valor menor al encontrado Chuluiza (2009) y Gonzales (2002); así mismo el contenido de sílice hallado fue de 2,94 por ciento menor al encontrado por este último autor en estudios realizados para esta misma especie. Estos bajos valores de cenizas y sílice obtenidos, se explican por la menor disponibilidad de estos minerales en los suelos donde se han desarrollado los culmos colectados para el estudio, según lo señalado por Andrade, citado por Santos *et al.* (2010).

En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos del análisis de composición química de cenizas de la materia prima, encontrándose macroelementos como el potasio (Na), calcio (Ca), magnesio (Mg) y algunos microelementos como zinc (Zn), cobre (Cu), manganeso (Mn) y hierro (Fe), algunos de ellos como Ca, Mg, Mn han sido reportados por Li, citado

por Chiluíza (2009) en las cenizas de bambú. Del análisis cuantitativo de estos elementos se encontró un mayor porcentaje de Ca, Mg y Mn y menor porcentaje de K, Na, Fe, Cu y Zn, corroborándose lo afirmado por Chen, citado por Londoño *et al.* (2002) quien afirma que la composición de cenizas cambia significativamente entre cañas de uno a siete años de edad observándose disminución en el contenido de cobre, zinc, fósforo, hierro y potasio y aumento en calcio, magnesio y manganeso en cañas maduras.

Tabla 8: Composición química de las cenizas de la materia prima.

Macro elementos	
Elemento	%
K	0,12
Ca	0,74
Mg	0,18
Na	0,02
Micro elementos	
Elemento	Ppm
Zn	0
Cu	1
Mn	50
Fe	5

FUENTE: Elaboración propia

El análisis de composición química de la materia prima se realizó como paso previo a la destilación seca, dada su influencia en los rendimientos del proceso, según lo mencionado por Pacheco (2005).

2. DEL PROCESO DE DESTILACIÓN SECA

En la Tabla 9 se muestran los valores promedio de rendimientos de productos obtenidos en el proceso de destilación seca, bajo los diferentes tratamientos estudiados.

Tabla 9: Rendimientos de productos obtenidos en el proceso de destilación seca*

<i>Tratamiento</i>	<i>Temperatura máxima de carbonización (C °)</i>	<i>Tiempo de destilación seca a T° max (min)</i>	<i>Rendimiento Carbón vegetal (%)</i>	<i>Rendimiento Licor piroleñoso (%)</i>	<i>Rendimiento Gases No condensables (%)</i>
T1	450	120	31,66	32,99	35,35
T2	450	150	31,05	35,43	33,52
T3	500	120	30,85	35,61	33,54
T4	500	150	30,07	38,91	31,02

* bms: base materia prima seca al aire, al 14% de humedad

FUENTE: Elaboración propia.

En la Tabla 10 se presentan los valores obtenidos del análisis de productos de destilación seca comparados con otros realizados para la misma especie.

Tabla 10: Comparación de rendimientos obtenidos en la destilación seca con otros estudios.

	<i>Rcv (%)</i>	<i>Rlp (%)</i>	<i>Rgnc (%)*</i>
ESTUDIO			
<i>Guadua angustifolia</i>	30,07 - 31,66	32,90 - 38,90	31,01 - 35,35
OTROS ESTUDIOS			
<i>Guadua angustifolia</i>			
Otavio <i>et al.</i> (1987)	32,70	37,60	29,60
Gonzales (2002)	32,00	22,00	46,00
Promedio bambú *			
Otavio (1987)	30,72	33,62	35,66

* Valores calculados con la fórmula $100 - (Rcv \% + Rlp \%)$

FUENTE: Elaboración propia.

2.1. RENDIMIENTO DE CARBÓN VEGETAL

El rendimiento de carbón vegetal obtenido en los diferentes tratamientos osciló desde 30,07 por ciento hasta 31,66 por ciento, valores menores al encontrado por Otavio *et al.* (1987) y González (2002) para la misma especie. Sin embargo, se encuentran cercanos al promedio de rendimiento de carbón para el bambú reportado por Otavio *et al.* (1987), al comparar diferentes especies (Ver Tabla 10). Así mismo, se encontró un rendimiento mayor al obtenido para *Guadua sarcocarpa* (29 por ciento) en el estudio realizado por Gonzales (2002).

Estos menores valores de rendimiento de carbón vegetal pese al mayor contenido de lignina encontrado (24,60 por ciento), se explican por la mayor tasa de calentamiento promedio usada en el estudio, aproximadamente 4,9 °C/min (Ver Tabla 11), a diferencia de las tasas de 1,6 °C/min y 4 °C/min usadas por Otavio *et al.* (1987) y Gonzales (2002) respectivamente; dado que mayores tasas de calentamiento influyen inversamente en el rendimiento de carbón vegetal (Gonzales 2002 y Pacheco 2005).

Tabla 11: Velocidades de calentamiento promedio de los tratamientos, en el proceso de destilación seca.

<i>Tratamiento</i>	<i>Temperatura (T °)</i>	<i>Tiempo (s)</i>	<i>Tasas de calentamiento °C/min</i>
T1	450	120	5,5
T2	450	150	6,0
T3	500	120	4,0
T4	500	150	4,4
Promedio			4,9

FUENTE: *Elaboración propia.*

Otro factor atribuible de variación en la obtención de menores rendimientos de carbón vegetal fue la menor densidad de la materia prima, 0,62 g/cm³; comparados con 0,65 g/cm³ y 0,63 g/cm³ encontrados en estudios realizados por Gonzales (2002) y Otavio *et al.* (1987) respectivamente; debido a que una mayor densidad de la materia prima contribuye a la obtención de mayores rendimientos de carbón vegetal, según lo encontrado por Santos *et al.* (2010).

En el análisis de variancia (ANVA) realizado se encontró influencia altamente significativa del factor temperatura y tiempo de manera independiente sobre el rendimiento de carbón vegetal, pese a ello al analizar la influencia de la interacción de estos dos factores en el rendimiento de carbón esta resultó no significativa. Sin embargo, la prueba Tukey encontró diferencias en la comparación de medias de los tratamientos, siendo altamente significativa la diferencia entre T1 (Rc=31,66 %) con T4 (Rc=30,07 %) y significativa entre T2 (31,05 %) con T4 (30,07 %) (Ver Anexo 2).

En la figura N° 26 se puede observar que a mayor tiempo y temperatura de destilación el rendimiento del carbón vegetal disminuye (relación indirecta), siendo mayor la diferencia entre T1 y T4, corroborándose que con el aumento de la temperatura en el proceso de destilación seca hay una consiguiente reducción en el rendimiento de carbón (Pacheco 2005). Así mismo, FAO (1983) afirma que el aumento de la temperatura disminuye el rendimiento del carbón porque aumenta el rendimiento del líquido y los gases que destila a madera, por lo tanto también disminuye el contenido de material volátil en el carbón vegetal.

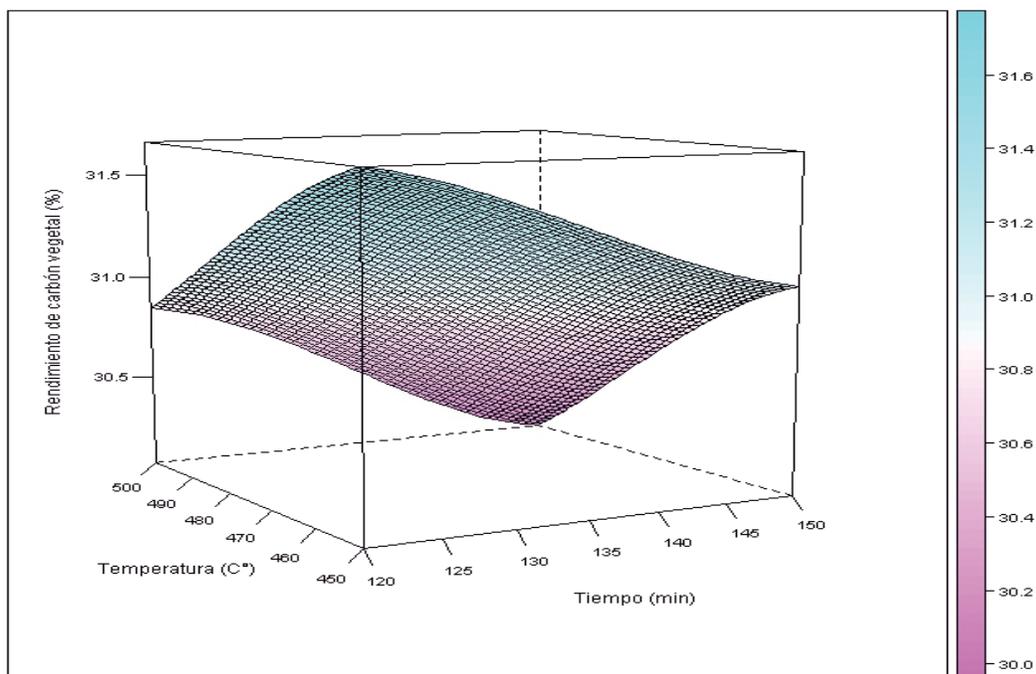


Figura 26: Rendimiento de carbón vegetal en los diferentes tratamientos.

FUENTE: Elaboración propia.

Según lo mencionado por Quinseng (2003) la mayor formación de carbón vegetal se dio en la etapa de carbonización propiamente dicha, posteriormente en la etapa final solo se dio el aumento de carbono en el carbón lo cual reduce su rendimiento, por lo que se concluye que a mayor tiempo de destilación el rendimiento disminuye.

Es importante señalar que el componente químico que más influyó en el rendimiento de carbón vegetal fue la lignina, según lo mencionado por Oliveira, citado por Santos *et al.* (2010) y Moura (2007); atribuido a su gradual descomposición térmica, en un rango de temperatura entre los 250 °C a 500 °C, siendo esta descomposición más rápida entre 310 °C y 420 °C, siendo el carbón vegetal el producto más abundante de su degradación con un 55 por ciento de rendimiento (Shafizadeh y Chin 1977). Además Oliveira, citado por Santos *et al.* (2010) indica que las otras macromoléculas de importancia como las celulosas y hemicelulosas a altas temperaturas de calentamiento como el caso de estudio, contribuyeron muy poco a la formación de carbón vegetal en el proceso.

2.2. RENDIMIENTO DE LICOR PIROLEÑOSO

Los rendimientos de licor piroleñoso obtenidos bajo los diferentes tratamientos varían de 32,90 a 38,90 por ciento, valores similares al obtenido por Otavio *et al.* (1987) y mayores al hallado por Gonzales (2002). Encontrándose dentro del promedio de rendimientos de licor esperado para el bambú (33,62 por ciento) al comparar diferentes especies, según lo indicado por Otavio *et al.* (1987) (Ver Tabla 10). Los valores de rendimiento de licor piroleñoso se aproximan al rango de 35 a 45 por ciento en peso esperado para el proceso de destilación seca, según lo indicado por Sardinha (2002).

Estos rendimientos de licor piroleñoso obtenidos en comparación con los otros bambúes son atribuidos al alto porcentaje de holocelulosa de la materia prima utilizada en el estudio (68 por ciento), ya que según lo indicado por Bravo, citado por Ordaz (2003) y FAO (1983) un alto porcentaje de holocelulosa incrementa la producción de licor piroleñoso. Así mismo, Oliveira, citado por Santos *et al.* (2010) menciona que un mayor porcentaje de hemicelulosas (componente que forma parte de la holocelulosa) favorece la producción de ácido acético, componente que forma parte del licor.

Según lo afirmado por Shafizadeh y Chin (1977) y Gómez y Wolfgang (2008), otro de los componentes que favoreció la producción de alquitranes, incrementando el rendimiento de licor piroleñoso es la lignina cuyo contenido en la materia prima fue alto. De igual manera Gonzales (2004) señala que la mayor contribución para la formación de alquitranes es la holocelulosa, cuyo contenido en la materia prima fue alto.

En el ANVA realizado se encontró influencia altamente significativa del factor temperatura y tiempo de manera independiente sobre el rendimiento de licor, pese a ello al analizar la influencia de la interacción de estos dos factores está resultado no significativa. Sin embargo, la prueba Tukey encontró diferencias altamente significativas entre todas las comparaciones de tratamientos a excepción del T2 (Rlp = 37%) obtenido a 450°C en 150 min, con T3 (Rlp = 35,61 %) obtenido a 500°C en 120 min. (Ver anexo 3).

En la Figura 27 se puede observar que a un mayor tiempo y temperatura de destilación el rendimiento de licor aumenta (relación directa). Corroborando lo afirmado por Pacheco (2005), FAO (1983) y Santos *et al.* (2010) quienes afirman que una mayor temperatura en el proceso tiene influencia directa en la producción de licor piroleñoso y gases no

condensables; así mismo el mayor tiempo de destilación disminuye la cantidad de materiales volátiles en el carbón vegetal, favoreciendo el rendimiento de licor según lo señalado por Gómez y Wolfgang (2008) y FAO (1983).

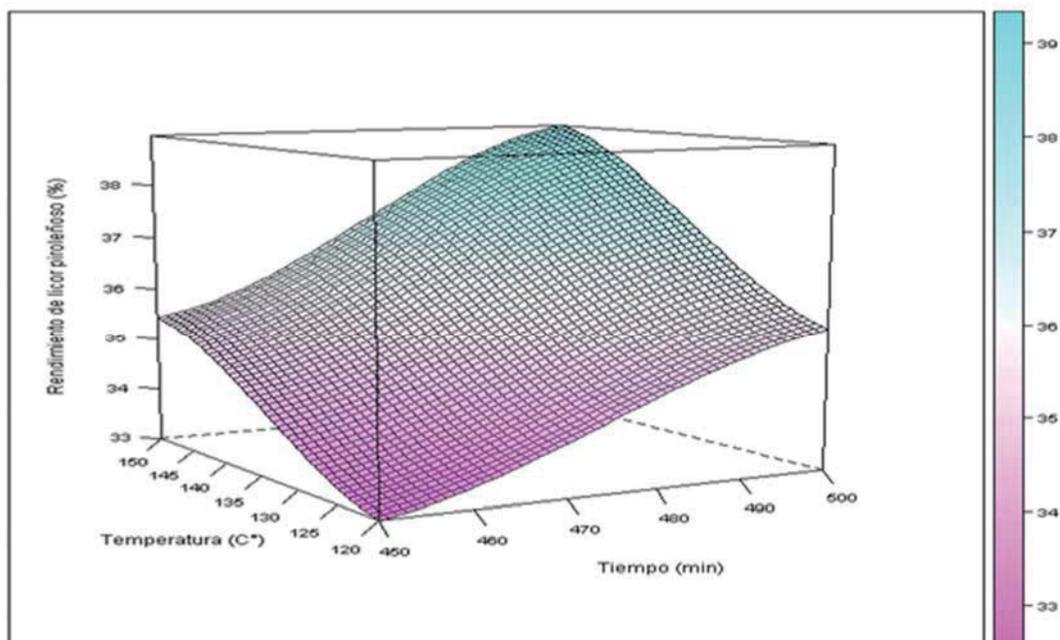


Figura 27: Rendimiento de licor piroleñoso en los diferentes tratamientos.

FUENTE: Elaboración propia.

Existen también otros factores de importancia en la formación de licor piroleñoso como la velocidad o tasa de calentamiento, según lo señalado por CETEC, citado por Santos *et al.* (2010), Gomez y Wolfgang (2008), Gonzales (2002) y Pacheco (2005) esta influye en los rendimientos de productos, teniéndose como regla general que mayores velocidades de calentamiento genera un menor rendimiento de carbón vegetal y aumento de productos volátiles que enriquecen la fase líquida y gaseosa. Para el licor piroleñoso se tiene que mayores velocidades de calentamiento provocan una mayor formación de alquitrán insoluble (Pacheco 2005, Gonzales 2002), por ello, con la finalidad de minimizar la influencia generada por la variación de las velocidades de calentamiento en la composición y rendimientos gravimétricos de los productos de destilación seca, estas fueron controladas, manteniéndolas similares en cada una de las etapas de destilación en todos los experimentos

realizados (Ver Tabla 12). Sin embargo, es importante resaltar que al tener la retorta a la leña como fuente de calentamiento externo, las tasas de calentamiento no pudieron ser controladas con exactitud.

Tabla 12: Tiempo y velocidades de calentamiento por rangos de temperatura, aplicados en los diferentes tratamientos

Rangos de temperatura de destilación seca	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3		Tratamiento 4	
	Tiempo de destilación (min)	Tasa de calentamiento °C/min	Tiempo de destilación (min)	Tasa de calentamiento °C/min	Tiempo de destilación (min)	Tasa de calentamiento °C/min	Tiempo de destilación (min)	Tasa de calentamiento °C/min
0 a 280 °C	24	11,70	24	11,70	25	11,20	30	10,30
280 a 450 °C	47	3,62	49	3,47	52	3,27	46	3,70
450 a 500 °C					40	1,25	36	1,39

FUENTE: Elaboración propia.

Quinseng (2003), Pacheco (2005) y Almeida, citado por Santos *et al.* (2010) señalan que la mayor formación de licor piroleñoso se dio en la etapa de carbonización propiamente dicha, entre 275 °C y 450 °C, dado la mayor degradación térmica de los componentes (holocelulosa, celulosa y lignina). Sin embargo, su formación se inició desde la primera etapa “etapa de secado” desde los 0° hasta 150 °C con la pérdida de humedad y pequeñas cantidades de ácido acético; en la etapa de pre carbonización entre 150 °C y 275 °C también hay formación de licor dado que las partes inestables de las hemicelulosas empiezan a reaccionar (Oliveira; citado por Santos *et al.* 2010). En las observaciones de los experimentos se corroboró que la mayor fracción de licor piroleñoso se produjo en el rango de temperatura correspondiente a la etapa de carbonización.

El licor piroleñoso obtenido de los diferentes experimentos presentaron dos fases o fracciones: una fracción acuosa o ácido piroleñoso y una fracción líquido oleosa o alquitrán de color oscuro, denominadas así por Glauco (2010) y Sardinha (2002). Por otro lado, Santos *et al.* (2010) señala que la fase acuosa está formada por alcoholes, cetonas y varios compuestos volátiles de bajo peso molecular y la fase líquido oleosa (alquitrán insoluble) está compuesta de agua, fenoles volátiles (creosota de madera) y brea.

2.3. RENDIMIENTO DE GASES NO CONDENSABLES

Los rendimientos de gases no condensables obtenidos en los diferentes tratamientos, varían de 31,01 a 35,35 por ciento, siendo estos mayores al encontrado por Otavio *et al.* (1987) y menores al hallado por González (2002) (Ver Tabla 10). Estas diferencias, según lo indicado por Glauco (2010), son explicadas por las diferentes tasas de calentamiento, tiempo de destilación y temperatura máxima usada en otros estudios. Sin embargo, se encontraron rendimientos cercanos al promedio esperado para el bambú al comparar diferentes especies como *Bambusa vulgaris*, *Dendrocalamus giganteus*, entre otras (Otavio *et al.* 1987).

Dado que los rendimientos de gases no condensables fueron estimados por diferencia del 100 por ciento menos los rendimientos de carbón y licor piroleñoso obtenido, no se realizó el análisis estadístico.

En la Figura 28 se puede observar que ha mayor tiempo y temperatura de destilación el rendimiento de gases no condensables disminuye (relación indirecta). Corroborando lo afirmado por Pacheco (2005), FAO (1983) y Santos *et al.* (2010), quienes afirman que una mayor temperatura en el proceso influye en la producción de gases no condensables.

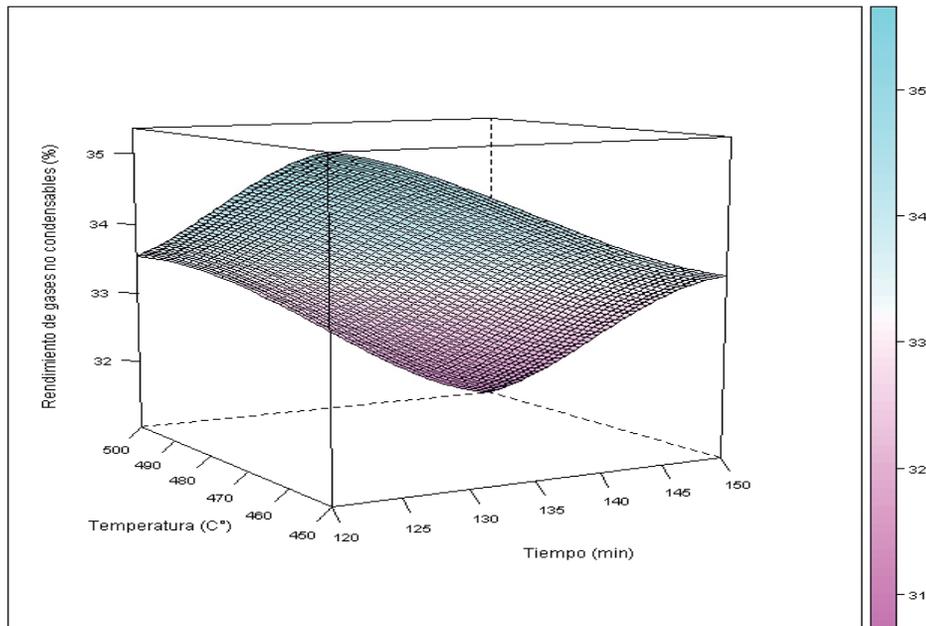


Figura 28: Rendimiento de GNC obtenidos en los diferentes tratamientos.

FUENTE: Elaboración propia.

Los gases no condensables liberados en el proceso de destilación seca están formados principalmente por monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarburos (Sardinha 2002, Santos *et al.* 2010 y Bueno 1987). Si bien es cierto, en el presente estudio no se realizó un análisis de composición y cuantificación de emisión de gases durante las diferentes etapas de destilación, es importante señalar que la composición y liberación de estos durante el proceso dependen sensiblemente de la temperatura interna variando en las diferentes etapas de destilación (Quisheng 2003, Otavio 1990 y Sardinha 2002).

Santos *et al.* (2010) indica que hasta 280 °C se desprenden gases oxigenados como el monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) que irán cediendo lugar a los gases hidrogenados cuando la temperatura del proceso aumenta. Este desprendimiento de hidrocarbónados sigue aumentando hasta la temperatura de 500 °C, incrementándose los gases combustibles principalmente metano (CH₄) y reduciéndose los niveles de CO₂, esperándose un aumento en el poder calorífico de los gases pero una disminución en su rendimiento.

3. DEL ANÁLISIS DE CARBÓN VEGETAL

En la Tabla 13 se presentan los resultados del análisis de las propiedades físico – químicas del carbón vegetal obtenidos bajo los diferentes tratamientos.

Tabla 13: Resultados del análisis de las propiedades físico – químicas del carbón vegetal obtenidos en los tratamientos.

<i>Tratamientos</i>	<i>Contenido de humedad (%)</i>	<i>Material volátil (%)</i>	<i>Cenizas (%)</i>	<i>Carbono fijo (%)</i>	<i>Densidad aparente de carbón vegetal molido (g/cm³)</i>	<i>Densidad aparente de carbón vegetal entero (g/cm³)</i>	<i>Poder calórico superior (kcal/kg)</i>
T1	6,79	13,86	9,19	76,98	0,31	0,30	6649
T2	5,79	11,19	9,25	79,56	0,30	0,30	6594
T3	5,84	10,92	10,04	79,10	0,28	0,29	6508
T4	4,84	9,18	9,52	81,17	0,28	0,30	6472

FUENTE: Elaboración propia.

En la Tabla 14 se presenta la comparación de los resultados obtenidos del análisis de carbón vegetal con otros estudios realizados para la misma especie.

Tabla 14: Comparación de los resultados obtenidos en la evaluación de las propiedades físico – químicas del carbón vegetal con otros estudios realizados para la misma especie.

	<i>Da (g/cm3)</i>	<i>Mv (%)</i>	<i>Cz (%)</i>	<i>CF (%)</i>	<i>PC (kcal/kg)</i>
ESTUDIO					
<i>Guadua angustifolia</i>	0,31 - 0,28	9,18 - 13,86	9,19 - 10,04	76,98 - 81,17	6472 - 6649
OTROS ESTUDIOS					
<i>Guadua angustifolia</i>					
Otavio <i>et al.</i> (1987)	0,46	6,30	12,30	79,30	6490
Gonzales (2002)	0,35	6,30	27,20	66,50	
Prías (2011)		13,00		86,00	
Promedio bambú *					
Otavio <i>et al.</i> (1987)	0,45		5,80	85,60	7868

FUENTE: Elaboración propia

3.1. CONTENIDO DE HUMEDAD

En la Tabla 13 se muestran los valores de contenido de humedad para el carbón vegetal encontrados en el estudio, los cuales oscilaron entre los 4,83 y 6,78 por ciento.

En el ANVA realizado no se encontró influencia significativa del factor tiempo y temperatura, así como de la interacción de estos sobre los valores promedio de contenido de humedad hallados en los diferentes tratamientos (Anexo 4), corroborándose esta afirmación con la prueba tukey.

Estos valores similares de humedad, se debieron a que el carbón vegetal obtenido en cada uno de los experimentos fue retirado en las mismas condiciones ambientales y almacenados de la misma manera; según lo indicado por Islas, citado por Rojas (2014), las diferencias en el contenido de humedad solo pueden ser atribuibles a la influencia de estos factores.

Los valores de contenido de humedad en carbón vegetal encontrados fueron menores al 10 por ciento cumpliendo así con las especificaciones de calidad señalados por FAO (1983), debido a que una mayor humedad provoca que el carbón tienda a desmenuzarse y producir carbónilla fina, además es un adulterante que baja su valor calorífico (Pacheco 2005).

3.2. CONTENIDO DE MATERIAL VOLÁTIL Y CARBONO FIJO

El contenido de material volátil obtenido en los tratamientos varían de 9,17 a 13,85 por ciento, siendo estos mayores al obtenido por Otavio *et al.* (1987) y González (2002) (Ver Tabla 14). Según, Rojas (2014) esto indica que el carbón vegetal obtenido tiene una mayor cantidad de residuos líquidos y alquitranosos que no fueron eliminados totalmente durante el proceso de carbonización; sin embargo estos valores se encuentran debajo del 30 por ciento, límite considerado para su clasificación como buen carbón vegetal (Pacheco 2005), dado que un carbón con mucho material volátil se enciende fácilmente pero al quemar produce humo, caso contrario uno con poco material volátil es difícil de encender y tiene una combustión más limpia.

En el ANVA realizado se encontró una influencia altamente significativa del factor temperatura y tiempo de manera independiente sobre el contenido de material volátil, así mismo, al analizar la influencia de la interacción entre estos dos factores sobre el rendimiento se encontró una influencia significativa. En la prueba Tukey realizada se hallaron diferencias altamente significativas en la comparación de todos los tratamientos a excepción del T2 (Mv=11,19 %) con el T3 (Mv=10,92 %) (Anexo 5); encontrándose una disminución en el contenido de material volátil a medida que se incrementa el tiempo y la temperatura de destilación.

En la Figura 29 se puede observar que ha mayor tiempo y temperatura de destilación el rendimiento de material volátil disminuye (relación indirecta). Este menor porcentaje de material volátil a medida que aumenta la temperatura y el tiempo de destilación seca confirma lo señalado por Rojas (2014) quien afirma que cuando la temperatura de carbonización es alta y prolongado el tiempo de exposición, el contenido de volátiles es bajo, caso contrario sucede cuando la temperatura de carbonización es baja y el periodo en el horno es breve. Así mismo FAO (1983), Pacheco (2005) y Santos *et al.* (2010) señalan que el aumento de la temperatura y exposición originan una mayor pérdida de material volátil, que origina un menor rendimiento de carbón vegetal, enriqueciendo las fases líquidas y gaseosas, generando un mayor rendimiento de carbono fijo en el carbón obtenido, relaciones encontradas en el estudio.

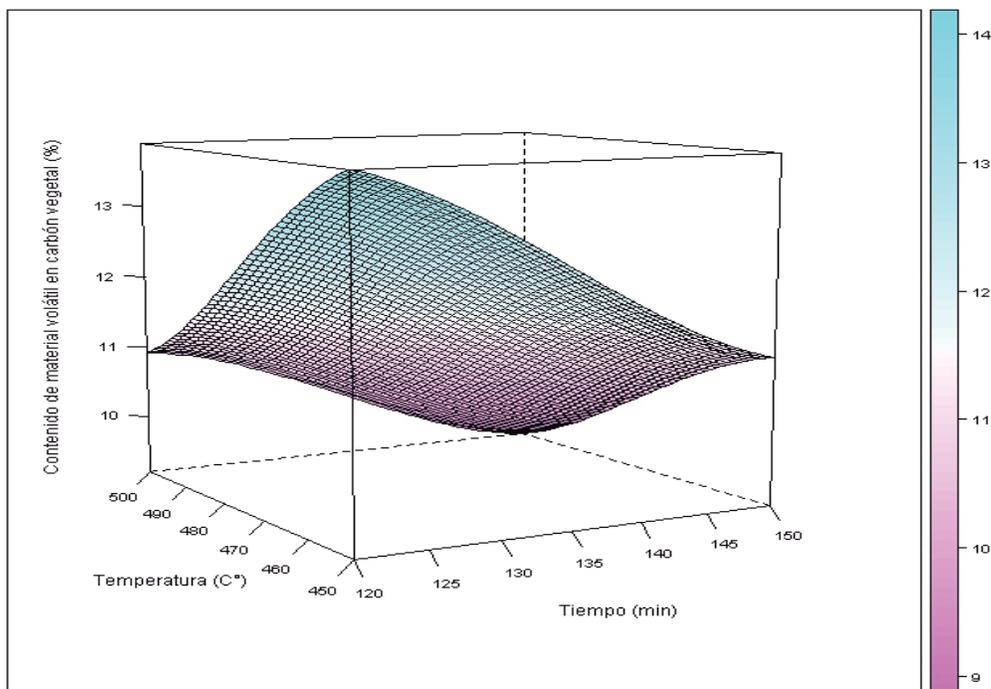


Figura 29: Contenido de material volátil en los diferentes tratamientos.

FUENTE: Elaboración propia.

En cuanto al porcentaje de carbono fijo obtenido en los diferentes tratamientos, estos oscilaron entre el 77,98 y 81,16 por ciento, valores similares al 79,30 por ciento encontrado por Otavio *et al.* (1987) y mayores al 66,50 por ciento encontrado por Gonzales (2002) para la misma especie (Ver Tabla 14). Así mismo, se encontraron menores rendimientos al compararlos con el promedio hallado por Otavio *et al.* (1987) para el bambú (85,60 por ciento) al comparar diferentes especies, atribuyéndose estas diferencias a la composición química de las especies y a otros factores del proceso como la velocidad de calentamiento.

Sin embargo, los rendimientos obtenidos se encuentran dentro del rango de 50 a 95 por ciento esperado para carbonos vegetales (Pacheco 2005) y altos al compararlos con otros estudios realizados para la misma especie, este mayor rendimiento es atribuido, al alto contenido de lignina (24,07 %) que permite la mayor formación de carbón vegetal y a los altos valores de tiempo y temperatura de destilación usados en el estudio que permitieron la mayor concentración de carbono en el carbón, según lo mencionado por García, citado por Rojas (2014).

En el ANVA realizado se encontró influencia altamente significativa del factor temperatura y tiempo de manera independiente sobre el rendimiento de carbono fijo, pese a ello al analizar la influencia de la interacción entre estos dos factores esta resultado no significativa. Sin embargo, en la prueba Tukey si se encontraron diferencias significativas entre todos los pares de tratamientos a excepción de T2 (79,56%) con el T3 (79,10%) (Anexo 6); encontrándose que a mayor temperatura y tiempo de destilación se alcanzaron valores más altos de carbono fijo en el carbón vegetal obtenido.

En la Figura 30 se observa el incremento del carbono fijo a mayor tiempo y temperatura de destilación (relación directa); este aumento del carbono fijo y reducción del contenido de material volátil a medida que aumenta la temperatura y tiempo de destilación mejora la calidad del carbón vegetal obtenido, según lo señalado por Santos *et al.* (2010).

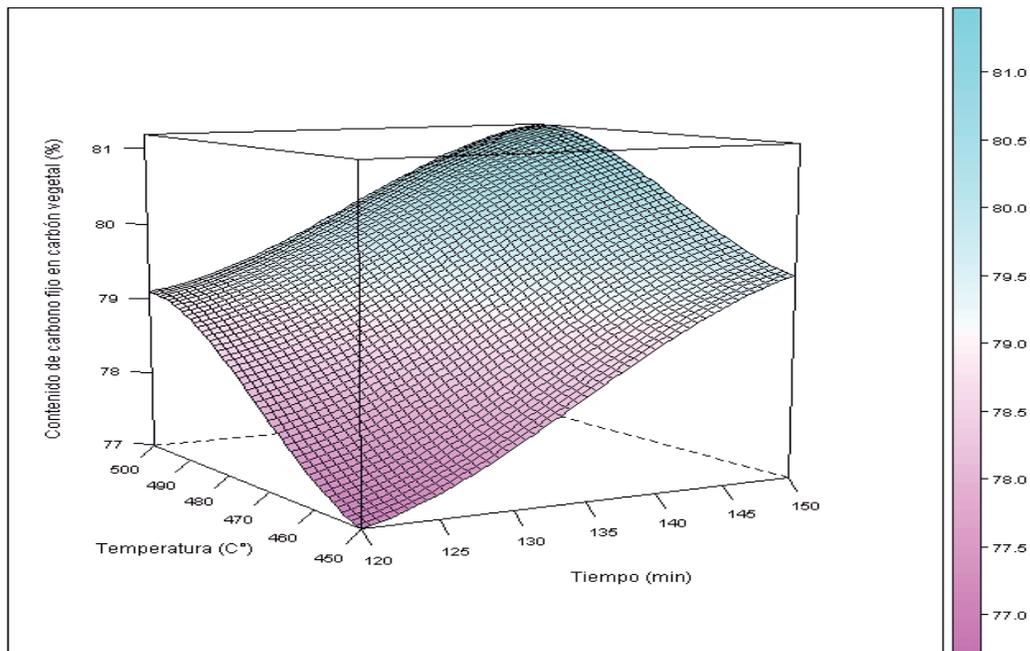


Figura 30: Contenido de Carbono fijo en los diferentes tratamientos.

FUENTE: Elaboración propia.

Según lo observado en la fase de experimentación el carbón vegetal obtenido en el T3 (Mv=10,92 %; Cf=79,10 %) y T4 (Mv=9,18 %; Cf=81,17 %) fue más quebradizo que el obtenido con el T1 (Mv=13,86 %; Cf=76,98 %) y T2 (Mv=11,19 %; Cf=79,56 %), esto se debió al menor contenido de sustancias volátiles y mayor porcentaje de carbono fijo en el carbón, según lo mencionado por Pacheco (2005).

3.3. CONTENIDO DE CENIZAS

Las cenizas son el residuo inorgánico que queda después de la combustión completa del carbón y que son absorbidas como contaminantes del suelo por la planta (Marcos, citado por Rojas 2014).

El contenido de cenizas encontrado en el estudio varió de 9,18 a 10,04 por ciento, valores menores a los reportados por Otavio *et al.* (1987) y Gonzales (2002) para esta especie (Ver Tabla 14). Este menor valor obtenido en el contenido de cenizas tiene relación directa con el contenido de cenizas en la materia prima que también fue bajo (4,94 por ciento), afirmando lo señalado por Marcos, citado por Rojas (2014).

El contenido de cenizas en el carbón encontrado para *Guadua angustifolia* es mayor al promedio encontrado para el bambú por Otavio *et al.* (1987) al compararlo con otras especies; debido a que esta especie tiende a acumular altos porcentajes de sílice (forma parte de las cenizas) en los nudos y la epidermis (Chen, citado por Londoño *et al.* 2002), perjudicando su calidad, ya que un buen carbón vegetal debe tener hasta un tres por ciento de cenizas; además la presencia de sílice ocasiona una pérdida en el valor calorífico del carbón, según lo afirmado por Pacheco (2005).

En el ANVA realizado no se encontró diferencias significativas en la interacción de estos dos factores sobre el porcentaje de cenizas en los diferentes tratamientos (Anexo 7). Sin embargo, al realizar la prueba de Tukey para la comparación de pares de tratamientos solo se hallaron diferencias altamente significativas en la comparación de los tratamientos T1 (Cz=9,19) con T3 (Cz=10,04) y T2 (Cz=9,25) con T3 (10,04) (Anexo 3D).

En la Figura 31 se presentan los resultados obtenidos bajo los diferentes tratamientos.

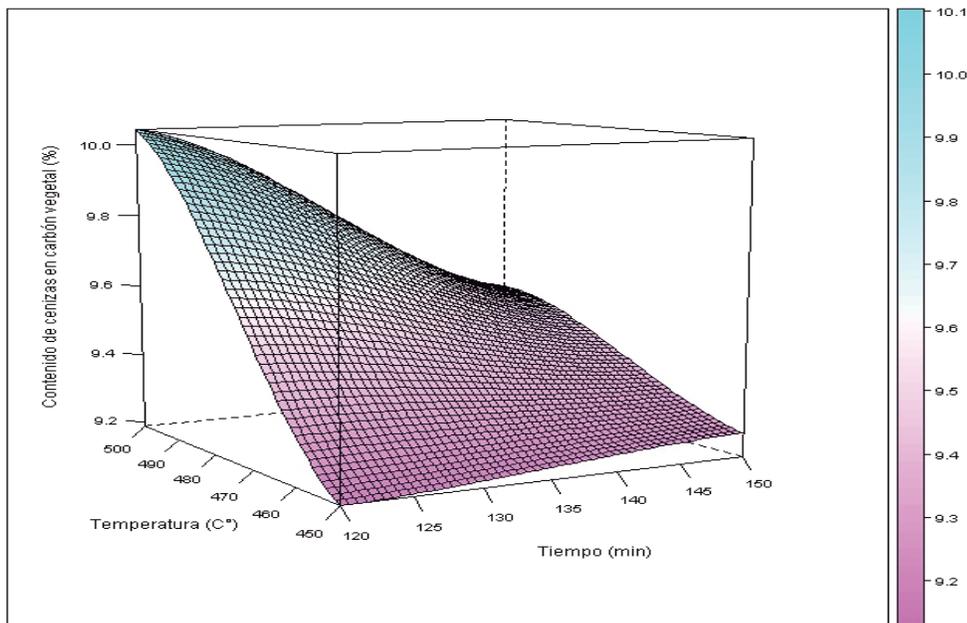


Figura 31: Contenido de cenizas en los diferentes tratamientos

FUENTE: Elaboración propia.

3.4. DENSIDAD APARENTE DE CARBÓN VEGETAL

La densidad aparente del carbón vegetal entero obtenido bajo los diferentes tratamientos oscilo entre 0,293 y 0,302 g/cm³ y para el carbón vegetal molido entre 0,270 y 0,310 g/cm³ siendo estos valores menores al encontrado por Otavio *et al.* (1987) y similares al hallado por González (2002) (Ver Tabla 14).

La baja densidad encontrada se explica por la utilización de mayores tasas de calentamiento en las primeras etapas, dado que según Pacheco (2005) ello genera la producción de un carbón más friable, porque promueve la formación de fisuras y grietas en el carbón durante el proceso, disminuyendo así su densidad. Otro factor que contribuyó a una menor densidad aparente fue la utilización de piezas grandes como materia prima, generando en el proceso fisuras internas bastante gruesas, capaces de enmascarar el valor de la densidad aparente, según lo señalado por Mendes, citado por Santos *et al.* (2010).

En el ANVA realizado para la densidad aparente de carbón vegetal entero y molido no se encontraron diferencias significativas del factor tiempo y temperatura de manera

independientemente, ni en su interacción .Siendo corroborada esta afirmación al realizarse la prueba Tukey (Anexo 8).

En las Figuras 32 y 33 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del carbón vegetal entero y molido respectivamente, bajo los diferentes tratamientos.

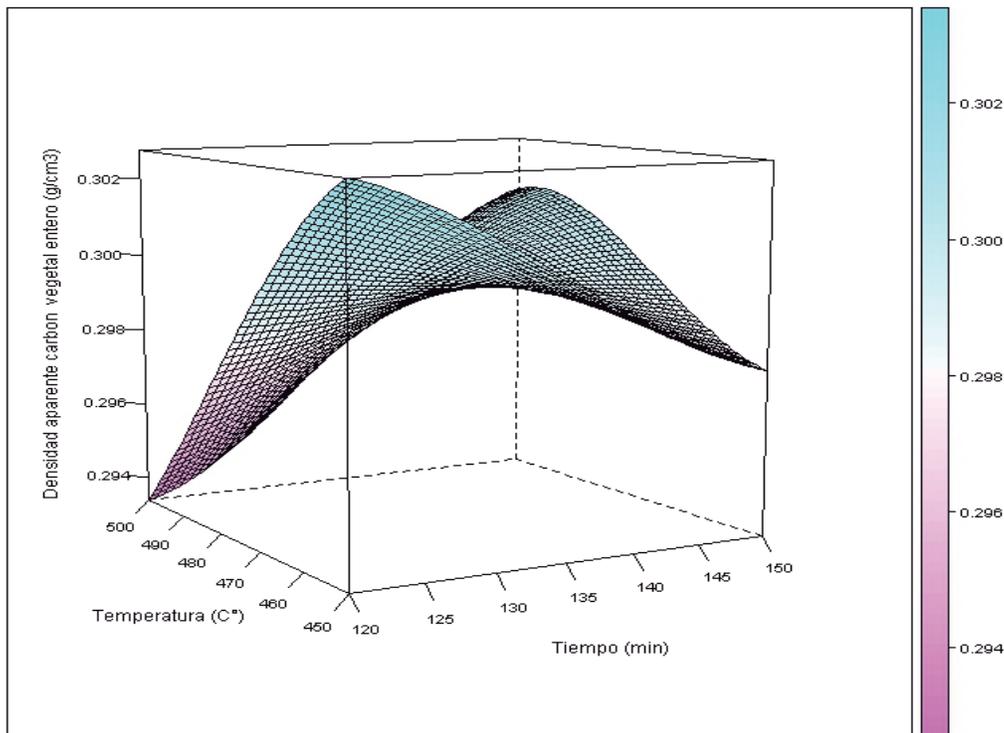


Figura 32: Densidad aparente de carbón vegetal entero (g/cm³) en los diferentes tratamientos.

FUENTE: Elaboración propia.

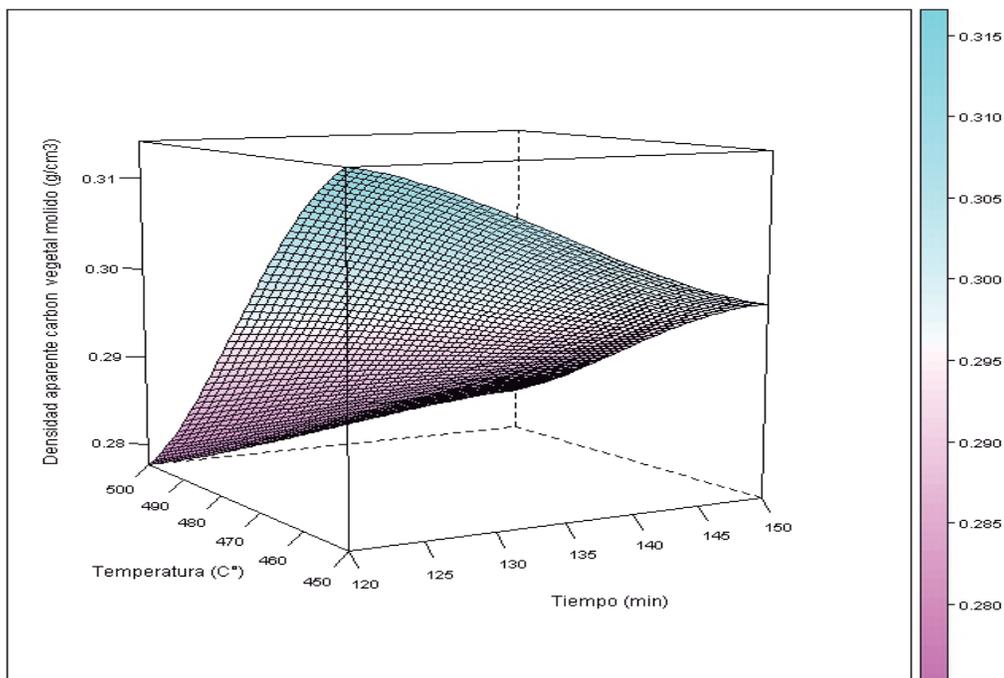


Figura 33: Densidad aparente de carbón vegetal molido (g/cm^3) en los diferentes tratamientos.

FUENTE: Elaboración propia.

Aunque no se hayan encontrado diferencias significativas en el estudio es importante señalar que un carbón vegetal obtenido a baja temperatura suele ser más denso que el que se obtiene a alta temperatura porque las sustancias volátiles disminuyen progresivamente a medida que aumenta la temperatura máxima de carbonización.

Los carbones obtenidos en el estudio son clasificados como de densidad media, según Marcos, citado por Ordaz (2003).

3.5. PODER CALÓRICO SUPERIOR

El poder calorico es la cantidad de calorías que el carbón produce al quemarse (Rojas 2014), siendo esta propiedad importante de evaluar en el carbón vegetal, según FAO (1983).

El poder calórico superior obtenido oscilo entre los 6 472 kcal/kg y 6 594 kcal/kg, valores semejantes al encontrado por Otavio *et al.* (1987) para la misma especie (Ver Tabla 14). Sin embargo, este poder calórico es menor a los encontrados para otros bambúes por este mismo autor, ello se relaciona a la mayor cantidad de carbono fijo encontrado en estas otras especies, debido a la existencia de una relación directa entre ambas variables, según lo señalado por Oliveira, citado por Santos *et al.* (2010) y Pacheco (2005).

En el ANVA realizado no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos respecto al poder calórico, corroborándose esta afirmación con la prueba Tukey (Ver anexo 9). En la Figura 34 se muestran los resultados obtenidos para el poder calórico superior bajo los diferentes tratamientos.

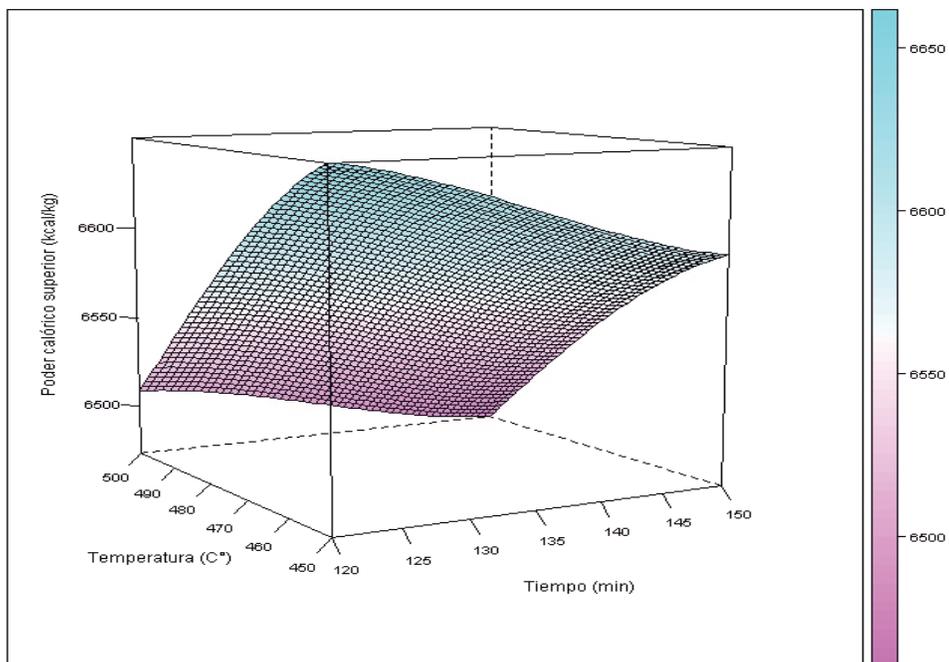


Figura 34: Poder calórico de carbón vegetal obtenido en los diferentes tratamientos.

FUENTE: Elaboración propia

Respecto al poder calórico superior en el carbón vegetal Pacheco (2005) y Oliveira, citado por Santos *et al.* (2010) señalan que un carbón con muchas sustancias volátiles presenta menor poder calorífico que uno con menos sustancias volátiles y alto contenido fijo de carbono. Por otro lado Santos *et al.* (2010) indican que el contenido de humedad de la materia prima se relaciona inversamente con el poder calorífico del carbón; caso contrario existe una relación directa con la composición química de la materia prima principalmente con la lignina que favorece el rendimiento de carbón vegetal, según lo mencionado por Bravo, citado por Ordaz (2003) y FAO (1983).

4. DEL ANÁLISIS DE LICOR PIROLEÑOSO

En la Tabla 15 se presentan los resultados del análisis de las propiedades del licor piroleñoso obtenidos bajo los diferentes tratamientos del estudio.

Tabla 15: Análisis de las propiedades del licor piroleñoso obtenido bajo los diferentes tratamientos.

<i>Tratamiento</i>	<i>Alquitrán insoluble (%)</i>	<i>Alquitrán soluble (%)</i>	<i>Acetona -metanol (%)</i>	<i>Ácido acético (%)</i>
T1	11,28	5,10	2,35	7,66
T2	12,80	5,15	2,39	7,91
T3	13,87	5,08	2,27	7,90
T4	15,39	5,28	2,14	7,74

FUENTE: Elaboración propia.

En el licor piroleñoso colectado de los diferentes experimentos se pudieron identificar claramente dos capas una acuosa, compuesta principalmente por alcoholes, cetonas y compuestos de bajo peso molecular y otra oleosa formada por alquitrán insoluble, según lo señalado por Sardinha (2002) y Santos *et al.* (2010).

Así mismo, al evaluar el vinagre de bambú (licor piroleñoso libre de alquitrán insoluble) obtenido bajo los diferentes tratamientos se encontraron las siguientes características: leve olor a quemado, densidad de 0,9935 a 1,0093 g/cm³, pH ácido de 2,92 a 3,17; valores similares a los encontrados por Mejía (2011) para esta misma especie.

4.1. RENDIMIENTO DE ALQUITRANES

El contenido de alquitranes en el licor piroleñoso, está referido al alquitrán insoluble y alquitrán soluble, dado que ambos forman parte del licor piroleñoso.

Santos *et al.* (2010) afirman que el alquitrán insoluble está formado por agua, fenoles, fenoles volátiles (creosota de madera) y brea) y cuyo contenido en el estudio varió de 11,28 a 15,39 por ciento; siendo estos rendimientos mayores al obtenido por Gonzales (2002) (2,30 por ciento), atribuida esta diferencia a que en el estudio realizado por este autor se obtuvieron mayores rendimientos de gases no condensables (46,00 por ciento) dándose una menor formación de licor piroleñoso.

Otro factor que favoreció el mayor rendimiento de alquitran insoluble en los diferentes tratamientos fue el alto contenido de holocelulosa y lignina en la materia prima (68,30 por ciento y 24,07 por ciento respectivamente), según lo señalado por Gomez y Wolfgang (2008) y Gonzales (2010).

En el ANVA no se encontró influencia significativa en la interacción de estos dos factores sobre contenido de alquitrán insoluble en los diferentes tratamientos (Anexo 10). Sin embargo, al realizar la prueba de Tukey si se encontraron diferencias altamente significativas en la comparación de todos los tratamientos (Anexo 4A), teniendo como regla general que una mayor temperatura y tiempo de destilación seca el rendimiento de alquitrán insoluble se incrementa (Ver Figura 35).

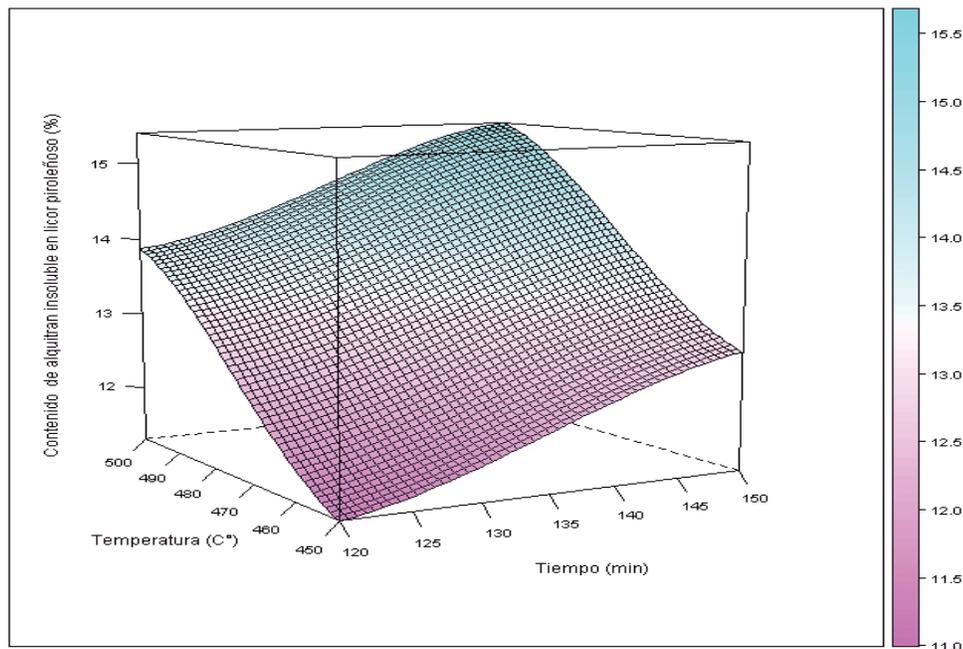


Figura 35: Porcentaje de alquitrán insoluble obtenido en los diferentes tratamientos

FUENTE: Elaboración propia

Este mayor rendimiento de alquitrán insoluble al aumentar la temperatura y tiempo de destilación seca (relación directa), ha sido favorecida por la degradación de la lignina que origina la mayor formación de alquitranes de elevado peso molecular, según Chávez (2013). De igual manera Shafizadeh y Chin (1977) señalan que el alquitrán insoluble es la tercera fracción de la degradación de la lignina con un 15 por ciento de rendimiento.

En cuanto al porcentaje de alquitrán soluble, se encontraron rendimientos que oscilaron entre el 5,08 y 5,28 por ciento; rendimientos mayores a los 3,70 por ciento encontrados por Gonzales (2002) siendo estos más parecidos a los resultados obtenidos para *Guadua sarcocarpa* (6,20 por ciento) por este mismo autor.

En el ANVA realizado no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos respecto al contenido de alquitrán soluble, corroborándose esta afirmación con la prueba Tukey (Ver anexo 11).

Esta similitud en los rendimientos obtenidos en los diferentes tratamientos se debió a que la formación de este tipo de alquitrán; conformado por moléculas de menores pesos moleculares; se dio principalmente en la etapa de carbonización antes de los 450°C, según Quinseng (2003) y Santos *et al.* (2010), y el mantener en todos los tratamientos los mismos tiempos y velocidades de calentamiento hasta la temperatura de 450°C favoreció el rendimiento homogéneo de alquitrán insoluble.

En la figura N° 36 se muestra porcentaje de alquitrán soluble obtenido bajo los diferentes tratamientos.

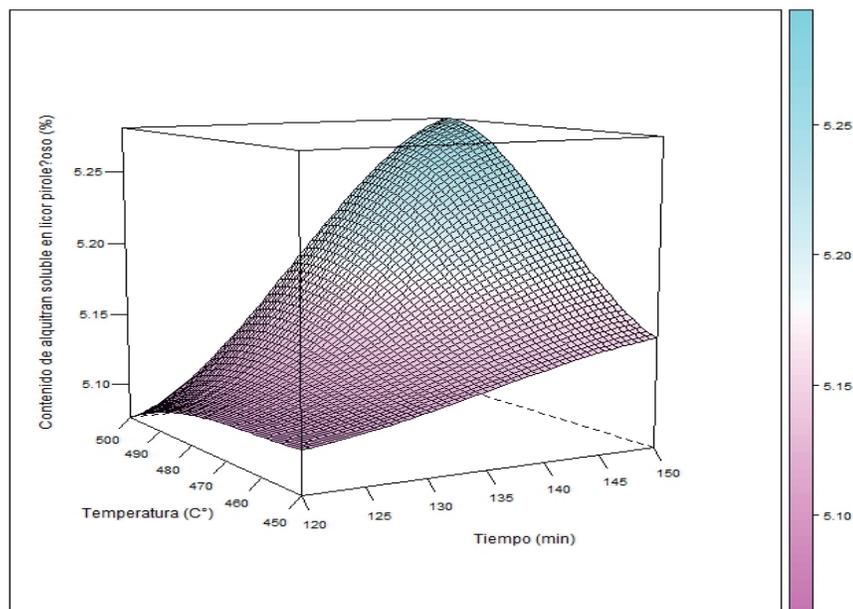


Figura 36: Porcentaje de alquitrán soluble obtenido bajo los diferentes tratamientos.

FUENTE: Elaboración propia.

Este tipo de alquitranes se caracterizan por formar una sustancia líquida bituminosa, viscosa, grasa, oscura y de olor fuerte. Actualmente usado en la elaboración de diversos productos, como jabones y cosméticos, pinturas, plásticos, y productos químicos (Agudo 2009).

4.2. PORCENTAJE DE ACETONA –METANOL Y ÁCIDO ACÉTICO

El porcentaje de acetona- metanol (volumen/masa) encontrado en el licor piroleñoso osciló de 2,13 a 2,39 por ciento, valores menores a los obtenidos por Gonzales (2002); esta diferencia es atribuida a ciertas diferencias en el proceso de destilación que origina una distinta composición química del licor.

En el ANVA realizado no se encontraron diferencias significativas en la interacción de las variables tiempo y temperatura sobre los tratamientos respecto al contenido de acetona – metanol, corroborándose esta afirmación con la prueba Tukey (Ver anexo 12). Es importante señalar que la mayor fracción de ácido acético, acetona y metanol se produce hasta antes de 380° C, según lo mencionado por Balat, citado por Crespo y Folgueras (2011) dado que estos compuestos provienen principalmente de la degradación de las hemicelulosas y celulosas.

Los resultados obtenidos para el porcentaje de acetona – metanol en el licor piroleñoso se muestran en la figura 37.

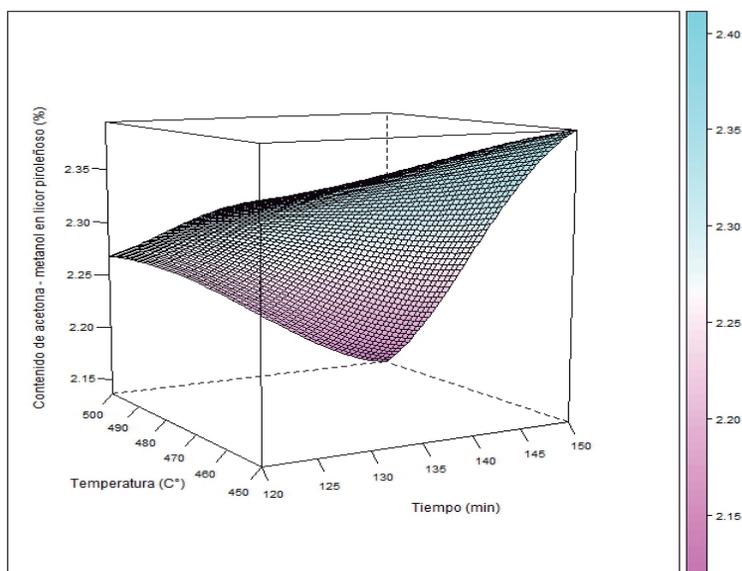


Figura 37: Porcentaje de acetona- metanol obtenido en los tratamientos.

FUENTE: Elaboración propia.

El destilado obtenido con la mezcla acetona- metanol poseía un olor característico de alcohol y color amarillento, por el arrastre de algún compuesto de bajo peso molecular al realizar la destilación fraccionada.

El porcentaje de ácido acético oscilo de 7,66 a 7,91 por ciento, valores similares al promedio encontrado por Mejía (2011) en un estudio similar.

En el ANVA realizado no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos respecto contenido ácido acético, corroborándose esta afirmación con la prueba Tukey (Ver anexo 13). Esta similitud en los rendimientos obtenidos en los diferentes tratamientos se explica en las similares condiciones de formación de este compuesto en los diferentes tratamientos, dado que proviene principalmente de la degradación térmica de las hemicelulosas (Balat, citado por Crespo y Folgueras 2011) cuya degradación es casi completa a los 325 °C (Shafizadeh y Chin, 1977) y su formación culmina antes de los 450 °C.

Los resultados obtenidos para el porcentaje de ácido acético en el licor piroleñoso se muestran en la figura 38.

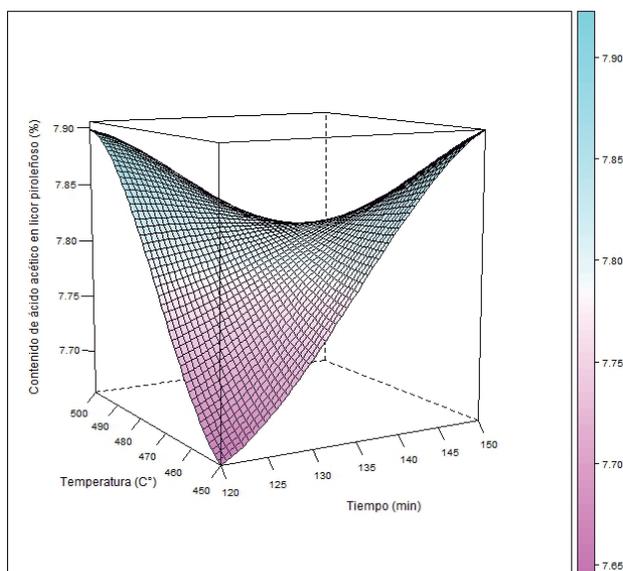


Figura 38: Porcentaje de ácido acético obtenidos en los tratamientos.

FUENTE: Elaboración propia.

V. CONCLUSIONES

- 1) En la destilación seca de bambú hubo influencia significativa inversa de los factores temperatura y tiempo de destilación, sobre los rendimientos de carbón vegetal y gases no condensables; sin embargo, la influencia fue directa sobre la formación de licor piroleñoso.
- 2) En el análisis de las propiedades del carbón vegetal, hubo influencia significativa de los factores temperatura y tiempo de destilación sobre algunas propiedades del carbón vegetal como contenido de material volátil (relación inversa), carbono fijo (relación directa); sin embargo en las otras propiedades evaluadas como contenido de cenizas, poder calórico y densidad aparente de carbón vegetal no se encontraron diferencias significativas.
- 3) En el análisis del licor piroleñoso hubo influencia significativa directa de los factores temperatura y tiempo de destilación sobre el contenido de alquitrán insoluble; sin embargo en las otras propiedades evaluadas como contenido de alquitrán soluble, acetona metanol y ácido acético no se encontraron diferencias significativas.
- 4) La composición química del culmo de *Guadua angustifolia* presento altos valores de holocelulosa y lignina, encontrándose en menor proporción las cenizas, sílice y extractivos al compararlos con otros estudios realizados para esta misma especie.
- 5) En general, el carbón vegetal de *Guadua angustifolia* obtenido en los diferentes tratamientos se caracteriza por tener bajos contenido de humedad, baja cantidad de materiales volátiles, altos valores de carbono fijo, altos valores de ceniza, mediana densidad y bajo poder calórico en comparación con las características esperadas para carbones vegetales señaladas por diversos autores; no pudiendo establecerse una clasificación de calidad de carbón vegetal, dado que ello varía según el uso final requerido.

- 6) En general, el licor piroleñoso de *Guadua angustifolia* obtenido en los diferentes tratamientos se caracteriza por tener altos rendimientos de alquitrán insoluble, rendimientos normales de alquitrán soluble, menores rendimientos de acetona - metanol y rendimientos normales de ácido acético en comparación con otros estudios realizados para la misma especie.

VI. RECOMENDACIONES

- Para la mejora del proceso de destilación seca en hornos tipo retorta se recomienda el ingreso de los gases no condensables liberados al sistema, a fin de cerrar el circuito y mejorar el uso de la energía, disminuyendo el consumo de leña como fuente externa de energía.
- Incluir en posteriores estudios la velocidad de calentamiento como factor independiente y evaluar su influencia en los rendimientos gravimétricos de productos de destilación seca.
- Realizar un análisis termogravimétrico en el proceso de destilación, para conocer con exactitud cómo se va incrementando el rendimiento de productos, principalmente licor piroleñoso, en las diferentes etapas.
- Utilizar una materia prima con humedad menor al 12 por ciento en base húmeda, de tamaño menor a 25 cm y seccionado longitudinalmente, a fin de obtener carbones con mayor valor calórico y densidad aparente.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudo, A. 2009. Los hidrocarburos aromaticos policiclicos: Acercamiento a su problemática como riesgo laboral. Ed. Comisión ejecutiva confederal. Madrid, ES, MCA - UGT. p. 46-47.
- Arauzo, J. 2002. Residuos convertidos en fuentes de energía (en línea). Aragón, ES, Gobierno de Aragón. Consultado 31 mayo 2014. Disponible en <http://www.aragoninvestiga.org/Residuos-convertidos-en-fuente-de-energia/>
- Arrabal, C; Montoya, J. 2013. Composición química de extractos de bambú (*Guadua angustifolia*). Madrid, ES, Sociedad Española de Ciencias Forestales. p. 1
- Azareño, C. 1988. Obtención de carbón activado a partir de la madera de algarrobo (*Prosopis pallida*) mediante método físico. Tesis Ing. Forestal. Lima, PE, UNALM. p. 58-62.
- Bazán, R. 1996. Manual para el análisis químico de Suelos, Plantas y Agua. Ed. Departamento de suelos. Lima, PE, UNALM. p. 60-62.
- Botero, L. 2004. Manual de la Industrialización del Bambú. Ed. Secretaría de Agricultura, ganadería, pesca y alimentos. Buenos Aires, AR, COMPYMEFOR. p. 48-52.
- Brito, O. 1990. Principios de producción y utilización de carbón vegetal de madera. Instituto de búsquedas y estudios forestales 36(2):13-17.
- Bueno, J. 1987. La madera como combustible. Revista Forestal del Perú 14(2):93.
- Castaño, F. 2001. Industrialización sostenible de la Guadua. Guadalajara de Buga, CO, USAID. p. 7-15.
- Castaño, F. 2004. Guadua para todos: cultivo y aprovechamiento. Bogotá, CO, Corporación autónoma regional de Risaralda. p. 56-68.

- Chavez, M; Domine, M. 2013. Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en Ciencias e Ingeniería* 4(4):15-46.
- Chiluiza, C. 2009. Elaboración de papel artesanal de caña Guadua (*Guadua angustifolia* Kunth.). Tesis Ing. Forestal. Quito, EC, EPN. p. 1-15.
- Crespo, N; Folgueras, B. 2011. Estudio de la degradación térmica de los pelets de madera. Ed. Departamento de energía. Oviedo, ES, UNIOVI. p. 1-8.
- Cuellar, A. 2009. Fibra de Guadua como refuerzo de matrices poliméricas. Ed. Departamento de Ingeniería Química. Manizales, CO, UNAL. p. 1-7.
- Departamento de salud de New Jersey, US. 2007. Ácido Acético: Hoja informativa sobre sustancias peligrosas. New Jersey, US, DSNJ. p. 1-6.
- Dilson, C. 2010. Produção de carvão vegetal de bambú (*Bambusa vulgaris*) com a recuperação de licor pirolenhoso e alcatrão. Tesis Ing. Forestal. Bahía, BR, UFRB. p. 17-23.
- Espinoza, A. 2010. Aptitud de *Guadua angustifolia* Kunth en la elaboración de tableros aglomerados con cemento. Tesis Ing. Forestal. Lima, PE, UNALM. p. 2-14.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1983. Métodos simples para fabricar carbón vegetal (en línea). Roma, IT. Consultado 12 mayo. 2014. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/x5328s/x5328s00.htm>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 2004. Unified Bioenergy Terminology (en línea). Roma, IT. Consultado 25 abr. 2014. Disponible en <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/007/j4504e/j4504e00.pdf>
- García, J; García, M; Das, K. 2008. Determinación de los parámetros cinéticos de la degradación térmica de los sub-productos de las plantas de beneficio mediante análisis termogravimétrico y calorimetría de barrido diferencial. *Revista de la sociedad americana de ingenieros agrícolas y biológicos* 51(2): 547-557.

- Glauco, A. 2010. Tecnología de la gasificación. Ed. Departamento de ingeniería térmica y de fluidos. Sao Paulo, BR, UNICAMP. p. 2-16.
- Gómez, P; Oliveira J. 1982. Teoría de la carbonización de la Madera: Uso de la madera para fines energéticos. Ed. Centro Tecnológico de Minas Gerais. Belo Horizonte, BR, CETEC. p. 27-36.
- Gomez, A; Wolfgang, K. 2008. Pirolisis de biomasa. Ed. Instituto de Ingeniería térmica. Kassel, DE, Universität Kassel. p. 27-36.
- Gonzales, E. 2002. Estudio de carbonización y sus productos de 02 especies de "paca" (*Guadua angustifolia* y *Guadua sarcocarpa*) provenientes de la zona de Iberia-Tahuamanu, Madre de Dios. Lima, PE, UNALM. p. 1-16.
- Gonzales, E. 2004. Apuntes de clase del curso de productos de transformación química de Madera. Lima, PE, UNALM.
- Gonzales, A, Ponce, O; Tulio, M. 2004. Producción y exportación de carbón vegetal a partir del Bambú como una alternativa al carbón natural y al Carbon tradicional (en línea). Quito, EC. Consultado 15 Jul. 2014. Disponible en <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/603>
- Gonzales, E. 2010. Descomposición térmica de la madera: Energía y Carbonización de la madera. Archivos del Curso de productos forestales de transformación química. Lima, PE, UNALM. Sólo resumen.
- Held, D. 2003. El sector productivo y el mercado regional de la Guadua en el eje cafetalero Colombiano (en línea). Bogotá, CO. Consultado 17 mayo 2014. Disponible en http://www.inbar.int/sites/default/files/resources/inbar_working_paper_no51.pdf
- Liese, W; Kumar, S. 2003. Compendio de preservación. Nueva Delhi, IN, CCTB. p. 11- 18

- Londoño, X; Camayo, G; Riaño, N; Lopez, Y. (2002). Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambúsoideae) culms (En inglés). *Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society* 16(1):18-31.
- Martínez, H. 2005. La cadena de la guadua en Colombia: Una mirada global de la estructura y dinámica. Ed. Observatorio agrocadenas Colombia. Bogotá, CO, MADR. p. 1-5
- Mejía, A. 2011. Identificación de compuestos volátiles del vinagre de *Guadua angustifolia* Kunth. (guadua). *Revista Cubana de Plantas Medicinales* 16(2): 11.
- Methanex corporation, ES. 2006. Información técnica y guía para el manejo seguro de metanol. 3 ed. Santiago de Chile, CL, Methanex corporation. p. 2-3.
- Mohan, D; Pittman, C; Steele, P. 2006. Pyrolysis of wood/Biomass for bio-oil: A critical review. *Energy and Fuels* 20(12): 848-850.
- Moreno, L; Osorio, L; Trujillo de los Ríos, E. 2006. Estudio de las propiedades mecánicas de haces de fibra de *Guadua angustifolia* (en línea). Manizales, CO. *Ingeniería y Desarrollo* no. 20. Consultado 19 mayo 2014. Disponible en http://ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/ingenieria_desarrollo/20/guadua_angustifolia.pdf
- Moura, E. 2007. Estudio teórico-experimental sobre la degradación térmica de vigas de Eucaliptus. *Maderas, Ciencia y tecnología* 9(2):135-144.
- Ordaz, J. 2003. Análisis de la calidad del carbón vegetal de Encino (*Quercus ilex*) producido en horno tipo colmena. Tesis Ing. Forestal. Chapingo, MX, UACH. p. 28-32.
- Otavio, J; Tomazello, M; Luiz de Barros, A. 1987. Producción y caracterización del carbón vegetal de especies y variedades de Bambú. Piracicaba, BR, IPEF. p. 13-17.

- Pacheco, G. 2005. Evaluación del proceso de carbonización y calidad del carbón de *Acacia caven* (Mol.). Tesis Ing. Forestal. Santiago de Chile, CL, UCHILE. 7, p. 32-37.
- Prías, J. 2011. Identificación de las variables óptimas para la obtención de carbón activado partir del precursor *Guadua angustifolia* Kunth. Revista académica colombiana de ciencias 35 (135): 28-32.
- Quisheng, Z; Shenxue, J; Thang, J. 2003. Industrial utilization on Bamboo. Technical report INBAR no. 26: 35-46.
- Ratanapisit, J. 2009. Preliminary evaluation of production and characterization of wood vinegar from rubberwood. Songklanakarin J. Sci. Technol 31(3):343-349.
- Rodriguez, M. 2005. Valorar la utilización del bambú "*Guadua angustifolia*" en la construcción de viviendas en la zona atlántica de Costa rica. Tesis Ing. Forestal. Guacimo, CR, EARTH. p. 8.
- Rojas, E. 2014. Calidad de carbón vegetal de Eucalyptus camadulensis producido en horno metálico de tambor tipo japonés mejorado. Tesis Ing. Forestal. Chapingo, MX, UACH. p. 20-29.
- Salgado, A; Azini, R. 1992. Caracterización física del carbón vegetal de Bambú. Campinas, BR, IAC. p. 45-42.
- Sanabria. 2007. Optimización de producción de carbón con *Aspidosperma quebracho blanco* en la provincia del Chaco. Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 13(1): 23-27.
- Sanchez, L. 2010. Caracterización morfológica de culmos de *Guadua angustifolia* Kunth por medio de microscopia electrónica de barrido. Ed. Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada. Querétaro, MX, UNAM. p. 3
- Santos, A; Camara, D; Oliveira, E. 2010. Produção de carvão vegetal. Ed. D Camara. Minas Gerais, BR, UFV. p. 5-29.
- Sardinha, A. 2002. Combustão Lenhosa Directa e Indirecta Sua Relevância para a Temática dos Fogos Florestais (En portugués). Silva Lusitana 10(1): 91- 100.

- Shafizadeh, F; Chin, P. 1977. Wood Technology. Chemical aspects 43(22):16.
- Stassen, H. 2002. Nuevas tecnologías de producción de carbón vegetal. Unasyuva 53(211): 34-35.
- Takashaki, J; Ascencios, D. 2004. Inventario de Bambú en el Perú. Lima, PE, AB Sustenta. 8 p.
- Universidad Austral de Chile. 2003. Carbon de Bambú. Boletín de Bambú en Chile no. 18:13.
- Velasquez, 2010. Optimización de la producción de carbón activado a partir de Bambú. Revista Mexicana de Ingeniería Química 9(3): 359-366.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1

CUADRO DE RESULTADOS PROMEDIO

<i>Tratamiento</i>	<i>Análisis del proceso de destilación</i>			<i>Análisis carbón vegetal</i>						
	<i>Rend. Carbón vegetal (%)</i>	<i>Rend. Licor piroleñoso (%)</i>	<i>Rend. Gases No condensables (%)</i>	<i>Contenido de humedad (%)</i>	<i>Material volátil (%)</i>	<i>Cenizas (%)</i>	<i>Carbono fijo (%)</i>	<i>Densidad aparente carbón vegetal molido (g/cm3)</i>	<i>Densidad aparente carbón vegetal entero (g/cm3)</i>	<i>Poder calórico superior (kcal/kg)</i>
T1	31,66	32,99	35,35	6,79	13,86	9,19	76,98	0,31	0,30	6649,00
T2	31,05	35,43	33,52	5,79	11,19	9,25	79,56	0,30	0,30	6594,27
T3	30,85	35,61	33,54	5,84	10,92	10,04	79,10	0,28	0,29	6508,63
T4	30,07	38,91	31,02	4,84	9,18	9,52	81,17	0,28	0,30	6472,37

Continuación

Análisis licor piroleñoso			
<i>Alquitrán insoluble (%)</i>	<i>Alquitrán soluble (%)</i>	<i>Acetona -metanol (%)</i>	<i>Ácido acético (%)</i>
11,28	5,10	2,35	7,66
12,80	5,15	2,39	7,91
13,87	5,08	2,27	7,90
15,39	5,28	2,14	7,74

ANEXO 2

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL RENDIMIENTO DE CARBÓN VEGETAL

```
Rend_carbonx<- aov(Rend_carbonx ~ as.factor(Temp)*as.factor(time),
destilacion) #lm

>bartlett.test(Rend_carbonx ~ Temp*time, destilacion)

Bartlett test of homogeneity of variances

data: Rend_carbonx by Temp by time
Bartlett's K-squared = 0.6163, df = 1, p-value = 0.4324

> anova(Rend_carbonx)
Analysis of Variance Table

Response: Rend_carbonx
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
as.factor(Temp)  1  1.46050  1.46050  13.6490  0.006091
**
as.factor(time)  1  2.41778  2.41778  22.5953  0.001439
**
as.factor(Temp):as.factor(time)  1  0.02085  0.02085  0.1949  0.670595
Residuals  8  0.85603  0.10700
---
Signif. codes:  0.01 '**' 0.05 '*'

> TukeyHSD(Rend_carbonx) #Tukey
Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = Rend_carbonx ~ as.factor(Temp) *
as.factor(time), data = destilacion)

$`as.factor(Temp)`
      diff      lwr      upr    p adj
150-120 -0.6977333 -1.133244 -0.2622227 0.006091

$`as.factor(time)`
      diff      lwr      upr    p adj
500-450 -0.8977333 -1.333244 -0.4622227 0.0014389

$`as.factor(Temp):as.factor(time)`
      diff      lwr      upr    p adj
150:450-120:450 -0.6143667 -1.469675  0.24094175 0.1770375
120:500-120:450 -0.8143667 -1.669675  0.04094175 0.0620612
150:500-120:450 -1.5954667 -2.450775 -0.74015825 0.0014971
120:500-150:450 -0.2000000 -1.055308  0.65530842 0.8747305
150:500-150:450 -0.9811000 -1.836408 -0.12579158 0.0259516
150:500-120:500 -0.7811000 -1.636408  0.07420842 0.0740010
```

ANEXO 3

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL RENDIMIENTO DE LICOR PIROLEÑOSO

```
rend_licorx<- aov(rend_licorx ~ as.factor(Temp)*as.factor(time),
destilacion)

>bartlett.test(rend_licorx ~ Temp*time, destilacion)

Bartlett test of homogeneity of variances

data: rend_licorx by Temp by time
Bartlett's K-squared = 0.4787, df = 1, p-value = 0.489

> anova(rend_licorx)
Analysis of Variance Table

Response: rend_licorx
          Df Sum Sq Mean Sq  F value
Pr(>F)
as.factor(Temp)          1  24.7523  24.7523   91.8596 1.164e-
05 ***
as.factor(time)          1  27.9902  27.9902  103.8758 7.364e-
06 ***
as.factor(Temp):as.factor(time)  1  0.5528  0.5528    2.0514
0.19
Residuals                8  2.1557  0.2695
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

> TukeyHSD(rend_licorx)
Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = rend_licorx ~ as.factor(Temp) * as.factor(time),
data = destilacion)

$`as.factor(Temp)`
      diff      lwr      upr    p adj
150-120 2.872417 2.18131 3.563524 1.16e-05

$`as.factor(time)`
      diff      lwr      upr    p adj
500-450 3.054517 2.36341 3.745624 7.4e-06

$`as.factor(Temp):as.factor(time)`
      diff      lwr      upr    p adj
150:450-120:450 2.443167 1.085887 3.800446 0.0018891
120:500-120:450 2.625267 1.267987 3.982546 0.0011782
150:500-120:450 5.926933 4.569654 7.284213 0.0000032
120:500-150:450 0.182100 -1.175180 1.539380 0.9717024
150:500-150:450 3.483767 2.126487 4.841046 0.0001658
150:500-120:500 3.301667 1.944387 4.658946 0.0002431
```

ANEXO 4

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL CONTENIDO DE HUMEDAD

```
> cont_humedx<- aov(cont_humedx ~
as.factor(Temp)*as.factor(time), destilacion)

> bartlett.test(cont_humedx ~ Temp*time, destilacion)

Bartlett test of homogeneity of variances

data: cont_humedx by Temp by time
Bartlett's K-squared = 1.4701, df = 1, p-value = 0.2253

> anova(cont_humedx)
Analysis of Variance Table

Response: cont_humedx
          Df Sum Sq Mean Sq F value
Pr(>F)
as.factor(Temp)          1  2.988  2.9875  0.6764
0.4347
as.factor(time)          1  2.713  2.7129  0.6142
0.4558
as.factor(Temp):as.factor(time)  1  0.000  0.0000  0.0000
0.9975
Residuals                8 35.334  4.4167
> TukeyHSD(cont_humedx)
Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = cont_humedx ~ as.factor(Temp) *
as.factor(time), data = destilacion)

$`as.factor(Temp)`
      diff      lwr      upr    p adj
150-120 -0.9979167 -3.795921 1.800088 0.4346517

$`as.factor(time)`
      diff      lwr      upr    p adj
500-450 -0.95095 -3.748955 1.847055 0.4557706

$`as.factor(Temp):as.factor(time)`
      diff      lwr      upr    p adj
150: 450-120: 450 -0.99393333 -6.488993 4.501127 0.9355741
120: 500-120: 450 -0.94696667 -6.442027 4.548093 0.9434468
150: 500-120: 450 -1.94886667 -7.443927 3.546193 0.6795908
120: 500-150: 450  0.04696667 -5.448093 5.542027 0.9999920
150: 500-150: 450 -0.95493333 -6.449993 4.540127 0.9421511
150: 500-120: 500 -1.00190000 -6.496960 4.493160 0.9341829
```

ANEXO 5

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL CONTENIDO DE MATERIAL VOLÁTIL

```
mat_volatilx<- aov(mat_volatilx ~ as.factor(Temp)*as.factor(time),
destilacion)

>bartlett.test(mat_volatilx ~ Temp*time, destilacion)

Bartlett test of homogeneity of variances

data: mat_volatilx by Temp by time
Bartlett's K-squared = 0.5025, df = 1, p-value = 0.4784

> anova(mat_volatilx)
Analysis of Variance Table

Response: mat_volatilx

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
as.factor(Temp)	1	14.6201	14.6201	103.9345	7.348e-06
as.factor(time)	1	18.3422	18.3422	130.3956	3.126e-06
as.factor(Temp):as.factor(time)	1	0.6409	0.6409	4.5561	0.04533 *
Residuals	8	1.1253	0.1407		

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> TukeyHSD(mat_volatilx)
Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = mat_volatilx ~ as.factor(Temp) *
as.factor(time), data = destilacion)

$`as.factor(Temp)`
      diff      lwr      upr    p adj
150-120 -2.207567 -2.706904 -1.708229 7.4e-06

$`as.factor(time)`
      diff      lwr      upr    p adj
500-450 -2.472667 -2.972004 -1.973329 3.1e-06

$`as.factor(Temp):as.factor(time)`
      diff      lwr      upr    p adj
150: 450-120: 450 -2.669767 -3.650426 -1.6891074 0.0001084
120: 500-120: 450 -2.934867 -3.915526 -1.9542074 0.0000542
150: 500-120: 450 -4.680233 -5.660893 -3.6995741 0.0000016
120: 500-150: 450 -0.265100 -1.245759  0.7155592 0.8221565
150: 500-150: 450 -2.010467 -2.991126 -1.0298074 0.0007971
      150: 500-120: 500 -1.745367 -2.726026 -0.7647074 0.0020325
```

ANEXO 6

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL PORCENTAJE DE CARBONO FIJO

```
carbonofijox<- aov(carbonofijox ~ as.factor(Temp)*as.factor(time),
destilacion)

>bartlett.test(carbonofijox ~ Temp*time, destilacion)

Bartlett test of homogeneity of variances

data: carbonofijox by Temp by time
Bartlett's K-squared = 0.0792, df = 1, p-value = 0.7784

> anova(carbonofijox)
Analysis of Variance Table

Response: carbonofijox
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
as.factor(Temp)      1 16.2092  16.2092  38.0465
0.0002686 **
as.factor(time)      1 10.4196  10.4196  24.4570
0.0011274 **
as.factor(Temp):as.factor(time) 1  0.1901  0.1901  0.4463
0.5229061
Residuals           8  3.4083  0.4260
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

> TukeyHSD(carbonofijox)
Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = carbonofijox ~ as.factor(Temp) *
as.factor(time), data = destilacion)

$`as.factor(Temp)`
      diff      lwr      upr      p adj
150-120 2.32445 1.455444 3.193456 0.0002686

$`as.factor(time)`
      diff      lwr      upr      p adj
500-450 1.86365 0.9946438 2.732656 0.0011274

$`as.factor(Temp):as.factor(time)`
      diff      lwr      upr      p adj
150: 450-120: 450 2.5762 0.86954068 4.282859 0.0056720
120: 500-120: 450 2.1154 0.40874068 3.822059 0.0173541
150: 500-120: 450 4.1881 2.48144068 5.894759 0.0002285
120: 500-150: 450 -0.4608 -2.16745932 1.245859 0.8226600
150: 500-150: 450 1.6119 -0.09475932 3.318559 0.0642474
150: 500-120: 500 2.0727 0.36604068 3.779359 0.0193342
```

ANEXO 7

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL PORCENTAJE DE CENIZAS

```
cenizasx<- aov(cenizasx ~ as.factor(Temp)*as.factor(time),
destilacion)

>bartlett.test(cenizasx ~ Temp*time, destilacion)

Bartlett test of homogeneity of variances

data: cenizasx by Temp by time
Bartlett's K-squared = 6.1192, df = 1, p-value = 0.01337

> anova(cenizasx)
Analysis of Variance Table

Response: cenizasx
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
as.factor(Temp)      1  0.15163  0.15163    2.1582 0.180007
as.factor(time)      1  0.95412  0.95412   13.5803 0.006173**
as.factor(Temp):as.factor(time)  1  0.25652  0.25652    3.6512 0.092417
Residuals           8  0.56206  0.07026
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

> TukeyHSD(cenizasx)
Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = cenizasx ~ as.factor(Temp) * as.factor(time),
data = destilacion)

$`as.factor(Temp)`
          diff          lwr          upr          p adj
150-120 -0.2248167 -0.5777125  0.1280791  0.180007

$`as.factor(time)`
          diff          lwr          upr          p adj
500-450  0.56395  0.2110542  0.9168458  0.0061732

$`as.factor(Temp):as.factor(time)`
          diff          lwr          upr          p adj
150: 450-120: 450  0.0676000 -0.6254594  0.7606594  0.9886435
120: 500-120: 450  0.8563667  0.16330724  1.5494261  0.0176454
150: 500-120: 450  0.3391333 -0.35392609  1.0321928  0.4461362
120: 500-150: 450  0.7887667  0.09570724  1.4818261  0.0269984
150: 500-150: 450  0.2715333 -0.42152609  0.9645928  0.6130200
150: 500-120: 500 -0.5172333 -1.21029276  0.1758261  0.1565536
```

ANEXO 8

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA DENSIDAD APARENTE DE CARBÓN ENTERO Y MOLIDO

```
dacarbon_enterox<- aov(dacarbon_enterox ~
as.factor(Temp)*as.factor(time), destilacion)

>bartlett.test(dacarbon_enterox ~ Temp*time, destilacion)

Bartlett test of homogeneity of variances

data: dacarbon_enterox by Temp by time
Bartlett's K-squared = 0.0041, df = 1, p-value = 0.9491

> anova(dacarbon_enterox)
Analysis of Variance Table

Response: dacarbon_enterox
              Df      Sum Sq   Mean Sq F value
Pr(>F)
as.factor(Temp)      1 0.00000588 5.8800e-06 0.0507
0.8275
as.factor(time)      1 0.00002408 2.4083e-05 0.2077
0.6607
as.factor(Temp):as.factor(time) 1 0.00012936 1.2936e-04 1.1159
0.3217
Residuals              8 0.00092742 1.1593e-04

> TukeyHSD(dacarbon_enterox)
Tukey multiple comparisons of means
95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = dacarbon_enterox ~ as.factor(Temp) *
as.factor(time), data = destilacion)

$`as.factor(Temp)`
              diff      lwr      upr      p adj
150-120 0.0014 -0.01293483 0.01573483 0.8274593

$`as.factor(time)`
              diff      lwr      upr      p adj
500-450 -0.002833333 -0.01716817 0.0115015 0.6606581

$`as.factor(Temp):as.factor(time)`
              diff      lwr      upr      p adj
150: 450-120: 450 -0.005166667 -0.03331915 0.02298581 0.9330222
120: 500-120: 450 -0.009400000 -0.03755248 0.01875248 0.7163875
150: 500-120: 450 -0.001433333 -0.02958581 0.02671915 0.9983255
120: 500-150: 450 -0.004233333 -0.03238581 0.02391915 0.9610766
150: 500-150: 450 0.003733333 -0.02441915 0.03188581 0.9726169
150: 500-120: 500 0.007966667 -0.02018581 0.03611915 0.8022964
```

```

dacarbon_mol i dox<- aov(dacarbon_mol i dox ~
as. factor(Temp)*as. factor(ti me), destil aci on)

> bartlett. test(dacarbon_mol i dox ~ Temp*time, destil aci on)

Bartlett test of homogenei ty of vari ances

data: dacarbon_mol i dox by Temp by ti me
Bartlett's K-squared = 2.9975, df = 1, p-val ue = 0.0834

> anova(dacarbon_mol i dox)
Analysi s of Variance Tabl e

Response: dacarbon_mol i dox

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value
Pr(>F)				
as. factor(Temp)	1	0.0000919	0.00009185	0.2195
0.65190				
as. factor(ti me)	1	0.0020593	0.00205932	4.9217
0.05732				
as. factor(Temp): as. factor(ti me)	1	0.0003121	0.00031212	0.7460
0.41290				
Residual s	8	0.0033473	0.00041842	

```

---
Signi f. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> TukeyHSD(dacarbon_mol i dox)
Tukey mul ti ple compari sons of means
95% fami ly-wi se confi dence l evel

Fit: aov(formula = dacarbon_mol i dox ~ as. factor(Temp) *
as. factor(ti me), data = destil aci on)

$`as. factor(Temp)`
      di ff      l wr      upr      p adj
150-120 -0.005533333 -0.03276686 0.0217002 0.6519028

$`as. factor(ti me)`
      di ff      l wr      upr      p adj
500-450 -0.0262 -0.05343353 0.00103353 0.057317

$`as. factor(Temp): as. factor(ti me)`
      di ff      l wr      upr      p adj
150: 450-120: 450 -0.015733333 -0.06921783 0.03775116 0.7841662
120: 500-120: 450 -0.036400000 -0.08988450 0.01708450 0.2084575
150: 500-120: 450 -0.031733333 -0.08521783 0.02175116 0.3000147
120: 500-150: 450 -0.020666667 -0.07415116 0.03281783 0.6226708
150: 500-150: 450 -0.016000000 -0.06948450 0.03748450 0.7759266
150: 500-120: 500 0.004666667 -0.04881783 0.05815116 0.9917902

```

ANEXO 9

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL PODER CALÓRICO SUPERIOR

```
PC<- aov(PC ~ as.factor(Temp)*as.factor(time), destilacion)
> bartlett.test(PC ~ Temp*time, destilacion)

Bartlett test of homogeneity of variances

data: PC by Temp by time
Bartlett's K-squared = 0.0298, df = 1, p-value = 0.8629

> anova(PC)
Analysis of Variance Table

Response: PC
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
as.factor(Temp)      1    6211    6211  0.6956 0.42848
as.factor(time)      1   51588   51588  5.7775 0.04293 *
as.factor(Temp):as.factor(time) 1     256     256  0.0286 0.86980
Residuals            8   71432    8929
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> TukeyHSD(PC)
  Tukey multiple comparisons of means
    95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = PC ~ as.factor(Temp) * as.factor(time),
data = destilacion)

$`as.factor(Temp)`
      diff      lwr      upr      p adj
150-120 -45.5 -171.3062  80.30619 0.4284756

$`as.factor(time)`
      diff      lwr      upr      p adj
500-450 -131.1333 -256.9395 -5.32714 0.0429315

$`as.factor(Temp):as.factor(time)`
      diff      lwr      upr      p adj
150:450-120:450 -54.73333 -301.8067 192.34007 0.8906343
120:500-120:450 -140.36667 -387.4401 106.70674 0.3317377
150:500-120:450 -176.63333 -423.7067  70.44007 0.1796809
120:500-150:450  -85.63333 -332.7067 161.44007 0.6939588
150:500-150:450 -121.90000 -368.9734 125.17341 0.4397305
150:500-120:500  -36.26667 -283.3401 210.80674 0.9636012
```

ANEXO 10

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL PORCENTAJE DE ALQUITRÁN INSOLUBLE

```
al qui tran_i nsol ubl ex<- aov(al qui tran_i nsol ubl ex ~
as. factor(Temp)*as. factor(ti me), desti l aci on)

>bartlett. test(al qui tran_i nsol ubl ex ~ Temp*ti me, desti l aci on)

Bartlett test of homogeneity of vari ances

data: al qui tran_i nsol ubl ex by Temp by ti me
Bartlett's K-squared = 7e-04, df = 1, p-val ue = 0. 9787

> anova(al qui tran_i nsol ubl ex)
Analysi s of Variance Table

Response: al qui tran_i nsol ubl ex
          Df Sum Sq Mean Sq F val ue
Pr(>F)
as. factor(Temp)          1  6. 9248  6. 9248  45. 412
0. 0001467 ***
as. factor(ti me)          1 20. 1839 20. 1839 132. 363 2. 954e-
06 ***
as. factor(Temp): as. factor(ti me)  1  0. 0000  0. 0000  0. 000
0. 9957692
Resi dual s                8  1. 2199  0. 1525
---
Signi f. codes:  0 '***' 0. 001 '**' 0. 01 '*' 0. 05 '.' 0. 1 ' ' 1
> TukeyHSD(al qui tran_i nsol ubl ex)
Tukey mul ti ple compari sons of means
95% fami ly-wi se confi dence level

Fi t: aov(formul a = al qui tran_i nsol ubl ex ~ as. factor(Temp) *
as. factor(ti me), data = desti l aci on)

$`as. factor(Temp)`
          di ff          lwr          upr          p adj
150-120 1. 5193 0. 9994008 2. 039199 0. 0001467

$`as. factor(ti me)`
          di ff          lwr          upr p adj
500-450 2. 593833 2. 073934 3. 113733 3e-06

$`as. factor(Temp): as. factor(ti me)`
          di ff          lwr          upr          p adj
150: 450-120: 450 1. 518067 0. 49702577 2. 539108 0. 0062095
120: 500-120: 450 2. 592600 1. 57155910 3. 613641 0. 0001791
150: 500-120: 450 4. 113133 3. 09209243 5. 134174 0. 0000058
120: 500-150: 450 1. 074533 0. 05349243 2. 095574 0. 0395151
150: 500-150: 450 2. 595067 1. 57402577 3. 616108 0. 0001779
150: 500-120: 500 1. 520533 0. 49949243 2. 541574 0. 0061498
```

ANEXO 11

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL PORCENTAJE DE ALQUITRÁN SOLUBLE

```
al qui tran_sol ubl ex<- aov(al qui tran_sol ubl ex ~  
as.factor(Temp)*as.factor(time), destilacion)
```

```
>bartlett.test(al qui tran_sol ubl ex ~ Temp*time, destilacion)
```

```
Bartlett test of homogeneity of variances
```

```
data: al qui tran_sol ubl ex by Temp by time  
Bartlett's K-squared = 2.7241, df = 1, p-value = 0.09884
```

```
> al qui tran_sol ubl ex<- aov(al qui tran_sol ubl ex ~ Temp*time, destilacion)
```

```
> anova(al qui tran_sol ubl ex)  
Analysis of Variance Table
```

```
Response: al qui tran_sol ubl ex  
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)  
Temp      1 0.04666 0.046663  0.7550 0.4102  
time      1 0.00790 0.007900  0.1278 0.7299  
Temp:time  1 0.01879 0.018794  0.3041 0.5964  
Residuals 8 0.49441 0.061801  
> HSD.test(al qui tran_sol ubl ex, c("Temp", "time"))  
>
```

```
$statistics
```

Mean	CV	MSerror	HSD
5.152242	4.825051	0.06180111	0.6500123

```
$parameters
```

Df	ntr	StudentizedRange
8	4	4.52881

```
$means
```

	al qui tran_sol ubl ex	std r	Min	Max
120: 450	5.103800	0.07312373	3 5.0276	5.1734
120: 500	5.075967	0.19293720	3 4.8986	5.2814
150: 450	5.149367	0.43356965	3 4.8586	5.6477
150: 500	5.279833	0.12903466	3 5.1856	5.4269

```
$comparison
```

```
NULL
```

```
$groups
```

	trt	means	M
1	150: 500	5.279833	a
2	150: 450	5.149367	a
3	120: 450	5.103800	a
4	120: 500	5.075967	a

ANEXO 12

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL PORCENTAJE DE ACETONA – METANOL

```
as. factor(Temp)*as. factor(time), destilacion)
> bartlett.test(acetona_metanol x ~ Temp*time, destilacion)

Bartlett test of homogeneity of variances

data: acetona_metanol x by Temp by time
Bartlett's K-squared = 1.186, df = 1, p-value = 0.2761

> acetona_metanol x<- aov(acetona_metanol x ~ Temp*time, destilacion)
> anova(acetona_metanol x)
Analysis of Variance Table

Response: acetona_metanol x
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Temp    1  0.005777  0.005777   0.3066 0.59489
time    1  0.085734  0.085734   4.5504 0.06547 .
Temp:time 1  0.023435  0.023435   1.2438 0.29711
Residuals 8  0.150726  0.018841
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> HSD.test(acetona_metanol x, c("Temp", "time"))
>
$statistics
      Mean      CV  MSerror  HSD
2.286158 6.004028 0.01884074 0.3588991

$parameters
      Df ntr StudentizedRange
      8   4           4.52881

$means
      acetona_metanol x      std r      Min      Max
120: 450      2.348433 0.05060487 3 2.2919 2.3895
120: 500      2.267767 0.23206582 3 2.0531 2.5140
150: 450      2.392933 0.12602953 3 2.3062 2.5375
150: 500      2.135500 0.05535449 3 2.0857 2.1951

$compari son
NULL

$groups
      trt      means M
1 150: 450 2.392933 a
2 120: 450 2.348433 a
3 120: 500 2.267767 a
4 150: 500 2.135500 a
```

ANEXO 13

ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL PORCENTAJE DE ACÍDO ACÉTICO

```
Aacet<- aov(Aacet ~ as.factor(Temp)*as.factor(time), destilacion)
```

```
> bartlett.test(Aacet ~ Temp*time, destilacion)
```

```
Bartlett test of homogeneity of variances
```

```
data: Aacet by Temp by time
```

```
Bartlett's K-squared = 0.2487, df = 1, p-value = 0.618
```

```
> Aacet<- aov(Aacet ~ Temp*time, destilacion)
```

```
> anova(Aacet)
```

```
Analysis of Variance Table
```

```
Response: Aacet
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Temp	1	0.00488	0.004876	0.0472	0.8335
time	1	0.00335	0.003350	0.0324	0.8616
Temp: time	1	0.12426	0.124257	1.2026	0.3047
Residuals	8	0.82657	0.103322		

```
> HSD.test(Aacet, c("Temp", "time"))
```

```
$statistics
```

Mean	CV	MSerror	HSD
7.800158	4.1209	0.1033215	0.8404636

```
$parameters
```

Df	ntr	StudentizedRange
8	4	4.52881

```
$means
```

	Aacet	std r	Min	Max
120: 450	7.661533	0.1276874	3 7.5717	7.8077
120: 500	7.898467	0.4811181	3 7.3430	8.1844
150: 450	7.905367	0.1400897	3 7.7437	7.9910
150: 500	7.735267	0.3819455	3 7.4936	8.1756

```
$comparison
```

```
NULL
```

```
$groups
```

	trt	means	M
1	150: 450	7.905367	a
2	120: 500	7.898467	a
3	150: 500	7.735267	a
4	120: 450	7.661533	a

ANEXO 14

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

Norma ASTM D-1762

Pesar 1 ± 0.1 gr. de carbón vegetal y colocar la muestra en un crisol previamente pesado, luego colocar la muestra a la estufa a 105° C por 3 horas hasta su peso constante, transcurrido el tiempo se dejar enfriar el crisol en el desecador y finalmente se pesa la muestra. Por diferencia de pesadas se determina el contenido de humedad expresado en porcentaje.

$$CH\% = \frac{(Phc - Psc) \times 100}{Phc}$$

CH = Contenido de humedad (%)

Phc = Peso húmedo del carbón (g)

Psc = Peso seco del carbón (g)

ANEXO 15

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE MATERIAL VOLÁTIL

Norma ASTM D-1762

Calentar la mufla a 950° C.

Pre-calentar los crisoles con sus tapas usados para el análisis de humedad, conteniendo la muestra. Los crisoles se pondrán sobre la puerta de la mufla, debiendo permanecer abierta durante 2 minutos y luego por 3 minutos sobre el borde exterior de la mufla.

Luego se coloca la muestra sobre la parte posterior de la mufla durante 6 minutos con la puerta cerrada, transcurrido el tiempo de ensayo se deja enfriar el crisol con la muestra en un desecador de vidrio. Enfriado el crisol se pesa y los resultados se expresaron en porcentaje.

$$MV\% = \frac{PS - P_{smv}}{PS} \times 100$$

MV = El material volátil (%).

PS = Peso seco de la muestra problema (g).

P_{smv} = Peso de la muestra sin material volátil (g).

ANEXO 16

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZAS

Norma ASTM D-1762

Colocar los crisoles destapados usados para el análisis de volátiles conteniendo la muestra, a 750° C durante 6 horas en la mufla, colocar las tapas dentro de la mufla. Enfriar los crisoles con las tapas colocadas en el desecador por 1 hora y pesar. Repetir el calentamiento de la muestra por 1 hora, poner en el desecador por 1 hora con su tapa y pesar, debiendo arrojar una pérdida menor a 0.0005 g.

Expresar los resultados en porcentaje.

$$Cz = \frac{PCz}{PS} \times 100$$

PS

Cz = El contenido de cenizas (%).

PCz = Peso de la ceniza (g).

PS = Peso seco de la muestra problema (g)

ANEXO 17

RESULTADOS DEL PODER CALÓRICO INFERIOR DE LAS MUESTRAS



INSTITUTO DE INVESTIGACION NUTRICIONAL
Av. La Molina 1885 (Ex Av. La Universidad 685) – La Molina
Telf.: (51-1) 349-6023 Fax: (51-1) 349-6025
RUC 20117792634

INFORME DE ENSAYO N° 452 - 14

CLIENTE : Gisella Gutierrez Tejada
PRODUCTO : 12 muestras de Carbón Vegetal de Bambú
MUESTRA : Preparada por el cliente en bolsas de papel
ENSAYO : VALOR CALORÍFICO
FECHA (Recepción): 13/05/ 2014
FECHA (Ensayo) : 14 /05/ 2014

Resultado del ensayo solicitado:

PRODUCTO	VALOR CALORIFICO (Kcal/100 g)	OBSERVACIONES
Carbón vegetal de Bambú # 7	640.87	
Carbón vegetal de Bambú # 8	653.34	
Carbón vegetal de Bambú # 9	648.15	
Carbón vegetal de Bambú # 10	645.39	
Carbón vegetal de Bambú # 11	643.43	
Carbón vegetal de Bambú # 12	644.47	

Método de ensayo empleado:
ASTM METHOD D-2015-66 (1972)


Juana del Valle
Laboratorio de Bioquímica

La Molina, 15 de Mayo de 2014

Nota: El presente Informe solamente es válido en su estado original.

Página 2 de 2



INSTITUTO DE INVESTIGACION NUTRICIONAL
Av. La Molina 1885 (Ex Av. La Universidad 685) – La Molina
Tel.: (51-1) 349-6023 Fax: (51-1) 349-6025
RUC 20117792634

INFORME DE ENSAYO N° 452 - 14

CLIENTE : Gisella Gutierrez Tejada
PRODUCTO : 12 muestras de Carbón Vegetal de Bambú
MUESTRA : Preparada por el cliente en bolsas de papel
ENSAYO : VALOR CALORÍFICO
FECHA (Recepción): 13/05/ 2014
FECHA (Ensayo) : 14 /05/ 2014

Resultado del ensayo solicitado:

PRODUCTO	VALOR CALORIFICO (Kcal/100 g)	OBSERVACIONES
Carbón vegetal de Bambú # 1	671.56	
Carbón vegetal de Bambú # 2	652.73	
Carbón vegetal de Bambú # 3	658.47	
Carbón vegetal de Bambú # 4	668.39	
Carbón vegetal de Bambú # 5	639.14	
Carbón vegetal de Bambú # 6	660.61	

Método de ensayo empleado:
ASTM METHOD D-2015-66 (1972)


Juana del Valle
Laboratorio de Bioquímica

La Molina, 15 de Mayo de 2014

Nota: El presente Informe solamente es válido en su estado original.

Página 1 de 2