

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN
VEGETAL DE RESIDUOS DE *Quercus sideroxyla* Humb & Bonpl.,
EN HORNOS TIPO COLMENA BRASILEÑO**

POR

ING. VERÓNICA BUSTAMANTE GARCÍA

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRA EN CIENCIAS FORESTALES

Linares, Nuevo León

Diciembre, 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

**EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CARBÓN
VEGETAL DE RESIDUOS DE *Quercus sideroxyla* Humb & Bonpl.,
EN HORNOS TIPO COLMENA BRASILEÑO**

TESIS DE MAESTRÍA

Para obtener el grado de
MAESTRA EN CIENCIAS FORESTALES

Presentada por:
ING. VERÓNICA BUSTAMANTE GARCÍA

COMITÉ DE TESIS

Dr. Artemio Carrillo Parra
Director

Dr. Humberto González Rodríguez
Asesor

Dr. Fortunato Garza Ocañas
Asesor

Dr. José Javier Corral Rivas
Asesor externo

Linares, Nuevo León

Diciembre, 2011

RECONOCIMIENTOS

Al Fondo de Cooperación Internacional en Ciencia y Tecnología Unión Europea México (FONCICYT, proyecto: 92739), por participar en colaboración entre las instituciones involucradas en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo otorgado para la realización de mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León a través de la Facultad de Ciencias Forestales, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

Al Dr. Artemio Carrillo, por sus consejos y la dirección acertada durante la maestría. Sus observaciones fueron muy importantes para el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Humberto González Rodríguez, por sus acertadas aportaciones ya que fueron importantes para la realización de esta tesis.

Al Dr. Fortunato Garza Ocañas, por su valiosa colaboración para mejorar esta tesis.

Al Dr. José Javier Corral Rivas, por sus consejos y amabilidad. Su profesionalismo me ha motivado a mejorar como profesionista. Gracias por su ayuda.

Se agradece el apoyo recibido de la empresa Noram de México, S. A. de C. V., en especial a la Master Allison L. Ludvík Vanderhop y al M.C. José Guadalupe García Molina, por motivarme a realizar esta tesis.

Al Dr. Eduardo Alanís, por su amistad y por creer en mi capacidad al darme el apoyo y la oportunidad de realizar una estancia académica en la Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo en Alicante, España.

A Diana Yemilet Ávila Flores por su amistad y su apoyo en los momentos más difíciles.

DEDICATORIA

A mis hijos:

Sheccid, Luis Ángel, Yocelin y Josué, por llenar mi vida de alegría, son quienes me motivan a seguir adelante y dar lo mejor de mí cada día. Nunca olviden que los amo.

A mi esposo:

Luis Aguilar Muños, por tu paciencia y amor. Gracias por estar con migo en los momentos más difíciles. Te quiero.

A mis padres:

Marco Antonio Bustamante Salazar y Consuelo García Hernández, les agradezco todo su amor, ejemplo y apoyo. Sin su ayuda no hubiera logrado esta meta. Gracias por todo.

A mis hermanos:

María de Lourdes, Marco Antonio y José Alfredo, por sus consejos, apoyo, paciencia y alegrías. Espero que siempre estemos unidos en los buenos y malos momentos. Los quiero mucho.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 3 |
| 2.1 Utilización de la biomasa | 3 |
| 2.2 Importancia de la dendroenergía..... | 4 |
| 2.2.1 Combustión completa | 5 |
| 2.2.2 Gasificación..... | 5 |
| 2.2.3 Licuefacción..... | 6 |
| 2.2.4 Pirólisis..... | 6 |
| 2.3 Infraestructura para la producción del carbón vegetal | 8 |
| 2.3.1 Métodos tradicionales | 8 |
| 2.3.2 Métodos tecnificados o industriales | 10 |
| 2.4 Factores que influyen en el rendimiento y calidad de carbón..... | 15 |
| 2.5 Producción y comercialización del carbón vegetal..... | 18 |
| 3. OBJETIVOS | 20 |
| 3.1 Objetivo general | 20 |
| 3.2 Objetivos específicos | 20 |
| 4. HIPÓTESIS..... | 21 |
| 5. JUSTIFICACIÓN | 22 |
| 6. MATERIALES Y MÉTODOS | 23 |
| 6.1 Ubicación del área de estudio | 23 |
| 6.2 Selección del material experimental | 23 |
| 6.3 Tratamientos evaluados..... | 24 |
| 6.4 Determinación de volumen | 25 |
| 6.5 Determinación de propiedades de la materia prima..... | 26 |
| 6.6 Proceso de carbonización..... | 26 |
| 6.7 Características fisicoquímicas del carbón | 29 |
| 6.8 Calidad granulométrica | 29 |
| 6.9 Rendimiento y tizos obtenidos | 30 |
| 6.10 Análisis estadístico..... | 31 |
| 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 33 |
| 7.1 Temperatura y tiempo de carbonización | 33 |
| 7.2 Rendimiento | 37 |

| | |
|-----------------------------|----|
| 7.3 Análisis inmediato..... | 39 |
| 7.4 Análisis elemental..... | 45 |
| 7.5 Granulometría..... | 51 |
| 7.6 Discusión general..... | 53 |
| 8. CONCLUSIONES..... | 55 |
| 9. RESUMEN..... | 56 |
| 10. ABSTRACT..... | 57 |
| 11. LITERATURA CITADA..... | 58 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de producción de carbón vegetal. | 14 |
| Cuadro 2. Rendimientos de carbón producido en diferentes tipos de hornos. | 15 |
| Cuadro 3. Estándares de calidad de acuerdo a las características fisicoquímicas del carbón vegetal para uso doméstico..... | 17 |
| Cuadro 4. Estándares de calidad de acuerdo a la granulometría del carbón vegetal para uso doméstico. | 17 |
| Cuadro 5. Temperatura final y tiempo total del proceso de carbonización de ramas y leña cuarteada de <i>Quercus sideroxyla</i> en horno colmena brasileños..... | 37 |
| Cuadro 6. Rendimientos y tizos obtenidos del proceso de carbonización de leña cuarteada y ramas en hornos colmena brasileño. | 38 |
| Cuadro 7. Análisis de la varianza del porcentaje de humedad en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.40 | |
| Cuadro 8. Análisis de la varianza del porcentaje de volátiles en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.41 | |
| Cuadro 9. Análisis de la varianza del porcentaje de cenizas en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$ | 42 |
| Cuadro 10. Análisis de la varianza del porcentaje de carbón fijo en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.43 | |
| Cuadro 11. Análisis de la varianza del poder calorífico en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$ | 45 |
| Cuadro 12. Análisis de la varianza del porcentaje de carbono en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.46 | |
| Cuadro 13. Análisis de la varianza del porcentaje de hidrógeno en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.47 | |
| Cuadro 14. Análisis de la varianza del porcentaje de oxígeno en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.48 | |
| Cuadro 15. Análisis de la varianza del porcentaje de nitrógeno en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.50 | |
| Cuadro 16. Análisis de la varianza del porcentaje de azufre en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$ | 51 |
| Cuadro 17. Análisis de la varianza de la clasificación granulométrica del carbón producido de dos residuos de aprovechamientos forestales de <i>Quercus sideroxyla</i> , $n=100$ | 52 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1. Principales transformaciones de la biomasa en energía. | 5 |
| FIGURA 2. Método de fosa de tierra para la elaboración de carbón vegetal. | 9 |
| FIGURA 3. Horno de parva para la producción de carbón vegetal. | 10 |
| FIGURA 4. Horno de ladrillo para la elaboración de carbón vegetal. | 11 |
| FIGURA 5. Horno tipo metálico transportable para la fabricación de carbón vegetal. | 12 |
| FIGURA 6. Diseño de horno tipo retorta para la producción de carbón vegetal. | 13 |
| FIGURA 7. Localización de las instalaciones de la empresa Noram de México. | 23 |
| FIGURA 8. Traslado de residuos forestales a la planta NORAM de México. | 24 |
| FIGURA 9. Residuos obtenidos de los aprovechamientos forestales a) ramas y b) leña cuarteada. | 24 |
| FIGURA 10. Características de horno tipo colmena brasileño. | 25 |
| FIGURA 11. Determinación del volumen de leña cuarteada. | 25 |
| FIGURA 12. Medición de contenido de humedad por medio del xilohigrómetro. | 26 |
| FIGURA 13. Muestra identificada con clavo y alambre galvanizado. | 27 |
| FIGURA 14. Encendido del horno por la parte superior. | 27 |
| FIGURA 15. Medición de la temperatura dentro del horno con termopares. | 28 |
| FIGURA 16. Muestras de carbón vegetal obtenidas después del proceso de carbonización. | 28 |
| FIGURA 17. Clasificación granulométrica de carbón elaborado a partir de residuos de <i>Quercus sideroxyla</i> . A es clase 1 (<2.0 cm), B es clase 2 (2 cm a 5 cm), C es clase 3 (5 cm a 10 cm) y D es clase 4 (10 cm a 15 cm). | 30 |
| FIGURA 18. Tizos obtenidos durante el proceso de carbonización. | 31 |
| FIGURA 19. Cambio de temperatura en función del tiempo el proceso carbonización de leña cuarteada de <i>Quercus sideroxyla</i> en hornos tipo colmena brasileño. Los puntos representan los valores observados, mientras que la línea continua representa a los valores estimados. | 33 |
| FIGURA 20. Liberación de humos color blanco por las chimeneas. | 34 |
| FIGURA 21. Cambio de la temperatura en función del tiempo durante el proceso carbonización de ramas de <i>Quercus sideroxyla</i> en hornos tipo colmena brasileño. Los puntos representan los valores observados, mientras que la línea continua representa a los valores estimados. | 35 |
| FIGURA 22. Humo color amarillo oscuro eliminado después de 70 a 76 h de encendido el horno. | 35 |
| FIGURA 23. Alquitrán negro liberado a través de los huidos inferiores del horno al utilizar residuos de ramas y leña cuarteada de <i>Quercus sideroxyla</i> | 36 |
| FIGURA 24. Humo azul claro liberado a 1007°C y sellado del horno para finalizar el proceso. | 37 |
| FIGURA 25. Clasificación granulométrica del carbón producido de dos residuos de aprovechamientos forestales de <i>Quercus sideroxyla</i> . Los valores ilustrados representan la media \pm desviación estándar, $n=100$ | 52 |

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la utilización y la importancia de la biomasa se ha incrementado significativamente a nivel mundial al considerarse una fuente de energía renovable que permite disminuir los efectos adversos ocasionados por la utilización de combustibles fósiles (Flotats, 2008; Baños *et al.*, 2011; Nakata *et al.*, 2011). Según Compeán (1994), las fuentes de energía y el porcentaje de consumo de éstas, se consideran indicadores para medir el grado de desarrollo de los países. La dendroenergía es ampliamente utilizada como combustible por los países en desarrollo, principalmente para la preparación de alimentos y en la industria.

Estudios recientes indican, que el consumo de combustibles sólidos como la leña y carbón generan mayores empleos por unidad de energía consumida; en cambio, los combustibles derivados del petróleo son los que generan menos empleo (Trossero, 2002). La actual crisis energética y el consecuente deterioro ambiental producido principalmente por el uso de fuentes fósiles, ha promovido la utilización de energía proveniente de otras fuentes consideradas limpias en países desarrollados como Austria, Francia y Alemania, entre otros estados de la Unión Europea (PNUMA, 2010). Por ejemplo, la transformación de biomasa en productos que generen gas, calor, electricidad y combustible, a través de la implementación de tecnologías y métodos eficientes se le denomina química verde (Martínez, 2009).

En México, la producción forestal maderable en el 2007 fue de 7 millones de m³r, de los cuales, la principal fuente de materia prima fueron los bosques de pino-encino. El estado de Durango, es el principal productor de madera en rollo del país, produjo 1,775,224 m³r que representó el 25.4% de la producción nacional. La producción forestal maderable se destinó principalmente en las industrias de escuadría, celulósicos, chapa, postes, durmientes y combustible (SEMARNAT, 2007). Se calcula que de cada árbol extraído para la producción forestal maderable, solo se aprovecha el 20%, y que el 40% es dejado en campo en las ramas, puntas y raíces, el restante 40% se desperdicia en la manufactura del proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín (Enciso, 2007). Los

residuos forestales son una fuente potencial de materia prima para la generación de energía, ya sea bajo esquemas de manejo silvícola o subproductos de la industria de transformación (PNUMA, 2010).

La calidad de los residuos para la generación de energía está en función de las características físicas y químicas como la densidad, contenido de humedad, lignina y constituyentes secundarios lo que mejora la relación rendimiento-calidad de los productos. Los productos combustibles que se pueden obtener a partir de los residuos forestales son: leña, carbón vegetal, pellets, briquetas, gas, etanol y electricidad. La producción del carbón vegetal es un proceso termo-químico llamado pirólisis, que consiste en la combustión de la biomasa en disponibilidad restringida de oxígeno lo cual impide que la combustión sea completa, su calidad como combustible son superiores a otros productos y que presenta alta reactividad, baja resistencia mecánica, alto poder calorífico y bajo contenido de cenizas (Romahn, 1992).

Los medios utilizados para la producción del carbón han tenido diferentes diseños en función de los avances tecnológicos y de las necesidades de las comunidades (Compeán y Quiñones, 2003). Existen métodos tradicionales como: los hornos de tierra o los métodos industriales como: hornos de ladrillo, metálicos transportables y retortas. La producción de carbón de buena calidad depende de varios factores, entre los que destacan: el tipo de horno y la secuela de carbonización (Sprenger, 1995). Sin embargo, el concepto de calidad depende también de la especie maderable utilizada, granulación, contenido de carbón fijo y gustos del consumidor (Camps y Martín, 2008).

En México, el principal problema que enfrenta la cadena productiva del carbón son los bajos rendimientos en la carbonización, que se reflejan en altos costos de producción y mayor desperdicio de los recursos. Por lo anterior y en la búsqueda de mejorar la eficiencia en la producción de carbón, en el presente estudio se evaluó la calidad, rendimientos y eficiencia energética en la producción del carbón vegetal producido a partir de residuos de ramas y leña cuarteada de *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl., en hornos tipo colmena brasileño en el estado de Durango.

2. ANTECEDENTES

2.1 Utilización de la biomasa

La biomasa es la materia orgánica formada de cualquier proceso biológico ya sea de origen vegetal o animal y puede ser utilizada como fuente de energía. En las plantas, durante el proceso de fotosíntesis, se almacena la energía solar en la clorofila al transformar el dióxido de carbono (CO₂) del aire y el agua del suelo en carbohidratos (Enciso, 2007).

El uso de la biomasa como combustible data desde tiempos en que el hombre aprendió a manejar el fuego, quizás el uso más antiguo fue en las primeras hogueras en las cuevas donde vivían nuestros antepasados (Antal y Gronli, 2003). Con el paso del tiempo en Egipto, se perfeccionó los sistemas de producción de biomasa leñosa y el uso progresivo del carbón vegetal constituyó la base energética de las antiguas civilizaciones (Patiño y Smith, 2008). Posteriormente, con el desarrollo industrial, la fundición de metales y los motores de combustión interna su utilización disminuyó al ser sustituida por el carbón mineral y el petróleo (Martín, 1989). Actualmente, en algunos países la biomasa es la principal fuente de energía y a nivel mundial se considera una forma moderna y limpia de obtener energía (Patiño y Smith, 2008).

Las fuentes más importantes de biomasa pueden ser los residuos agrícolas, árboles muertos, podas, aprovechamientos forestales, árboles obtenidos durante el cambio de uso de suelo, huertos, cultivos de sistemas agroforestales (Camps y Martín, 2008). Trosero (2002), identifica a los residuos forestales de origen industrial como subproductos de las industrias forestales encontrando los producidos en aserraderos, fábricas de tableros de partículas, carpinterías, etc. Estos subproductos son a menudo una fuente importante de combustible, principalmente en los países desarrollados. Algunos autores aseguran que los residuos de los aprovechamientos forestales e industriales son una importante fuente de energía, al considerar su alto contenido calórico, alta densidad y bajo contenido de humedad (FAO, 1983; Márquez *et al.*, 2001; Richardson *et al.*, 2002; Sanz y Piñeiro, 2003; Velázquez, 2006).

La capacidad de producción de biomasa a gran escala es de 40 millones de toneladas al año, de la cual la participación de biomasa sólida es del 40 al 50% (Wu *et al.*, 2011). Según PNUMA (2010), la biomasa en sus diferentes formas, son una importante fuente de energía para más de dos mil millones de personas a nivel mundial. En México, no se tienen estimaciones confiables de la cantidad de residuos que se producen durante el aprovechamiento forestal, en similar condición se encuentra la estimación de los residuos de la industrialización de los productos forestales.

2.2 Importancia de la dendroenergía

El consumo de los derivados del petróleo y el carbón mineral son la causa del 90% de los óxidos de azufre y nitrógeno emitidos a la atmósfera, que posteriormente, son transformados en ácido sulfúrico y ácido nítrico, los cuales son la principal fuente de la lluvia ácida (Márquez, 2009). Es por ello que el uso excesivo de combustibles fósiles contribuye al efecto invernadero y al calentamiento global (Flotats, 2008; Baños *et al.*, 2011; Nakata *et al.*, 2011). La dendroenergía surge a partir del desarrollo de nuevos modelos energéticos con el objetivo de mitigar la pobreza, reducir la crisis energética y los daños ocasionados al ambiente; además, es una alternativa sustentable como fuente de energía limpia, incorpora a la atmósfera sólo el CO₂ absorbido durante el desarrollo de las plantas (Demirbas, 2004; Martínez, 2009; Conesa y Domene, 2011).

Según Martínez (2009), la utilización de la biomasa representa la primera forma de energía renovable de mayor consumo seguida la energía eólica e hidráulica. El uso energético de la biomasa permite una mayor eficacia en la gestión forestal al obtener biogás, calor, electricidad y biocombustible, a través de procesos de combustión directa, termoquímica y bioquímica, respectivamente (Márquez, 2009; Wu *et al.*, 2011). De estos procesos se pueden obtener productos como carbón vegetal, gas, etanol y electricidad como se ilustra en la Figura 1. Sobre esta figura se observa que la madera antes de ser transformada térmicamente es modificada por el secado, después se somete a un proceso de combustión, pirolisis o gasificada.

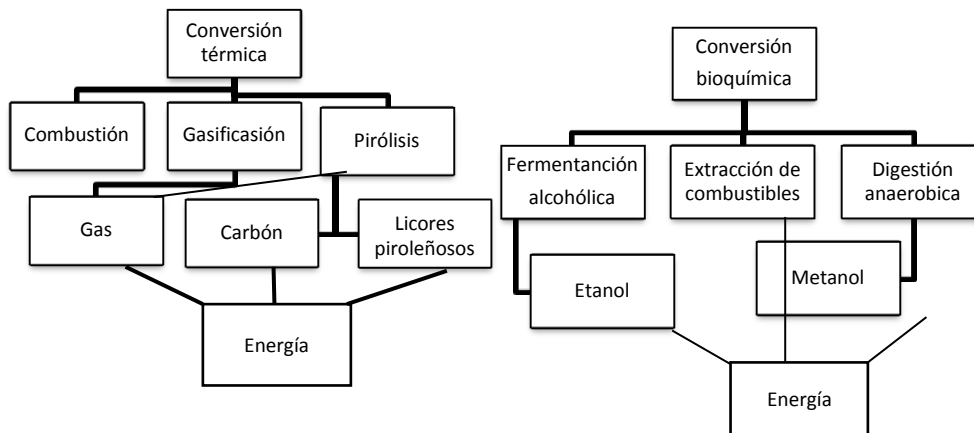


FIGURA 1. Principales transformaciones de la biomasa en energía.

2.2.1 Combustión completa

Es el proceso en el que se quema la biomasa con aire; es decir, se realiza la oxidación total de los elementos de la biomasa CO_2 y H_2 por el oxígeno del aire, durante la reacción se libera energía química del combustible. Se liberan gases calientes a una temperatura de 800 a 1000°C. Éste sistema es empleado para el aprovechamiento de recursos leñosos, su consumo presenta cifras importantes dentro del consumo energético de los países desarrollados y en desarrollo. La principal ventaja es que se favorece al medio ambiente al disminuir la emisión de gases de efecto invernadero. En los últimos años este proceso térmico predomina en las aplicaciones industriales y consumo doméstico (Serrano, 2009).

2.2.2 Gasificación

La gasificación se puede realizar por dos métodos: gasificación térmica y gasificación bioquímica. En la gasificación térmica se produce un cambio químico en la materia orgánica, mediante diversas reacciones heterogéneas a altas temperaturas. Es un proceso de conversión de la biomasa en gas mediante un proceso de oxidación parcial a altas temperaturas. La temperatura durante el proceso puede variar de 800 a 900°C para alcanzar una descomposición y optimizar la producción de gas. Se considera un proceso energéticamente neutro y el gas generado puede ser de composición variable. Durante el proceso de gasificación se puede obtener gas combustible, una fracción líquida y

alquitranes. El gas obtenido se compone de N_2 (40-50%), H_2 (15-20%), CO (10-20%), CO_2 (10-15%), CH_4 (3-5%), además de partículas de alquitrán, cenizas y metales alcalinos (Márquez, 2009).

La gasificación bioquímica es el resultado de la fermentación anaeróbica u oxidación parcial de la materia orgánica biodegradable, producida por determinados microorganismos bajo condiciones controladas de temperatura y humedad. La producción de gas en grandes cantidades, regularmente es quemada para generar energía térmica o energía eléctrica. Según Martínez (2009), el biogas se compone de CH_4 (50-80%), CO_2 (20-45%) y H_2 (<2%).

2.2.3 Licuefacción

Es un proceso termoquímico para la obtención de combustibles líquidos a temperaturas que van de 525 a 600°C, altas presiones con valores de 5 a 20 MPa, alta presión parcial de hidrógeno y el uso de catalizador para mejorar la reacción y/o provocar la selectividad del proceso. El producto es un líquido comercial de mayor calidad que el obtenido mediante el proceso de pirólisis, el poder calorífico va de 35 a 40 $MJ\ kg^{-1}$ y un menor contenido de oxígeno.

2.2.4 Pirólisis

En este proceso se realiza una transformación térmica de la materia orgánica por la acción del calor en ausencia de oxígeno. En la descomposición térmica se presenta una serie compleja de reacciones químicas, además de procesos de transferencia de masa a calor. Los parámetros físicos que influyen durante el proceso de pirólisis son el radio de carbonización o acumulación de calor, pretratamientos térmicos, atmósfera, presión, catalizadores, tipos de biomasa y temperatura final. La pirólisis puede realizarse a distintas velocidades de calentamiento como la pirólisis convencional o carbonización, pirólisis rápida, lenta, pirólisis flash y la reactiva (Guardado *et al.*, 2010).

La carbonización normal se presenta en un intervalo de temperaturas de 400 a 600°C, con tiempos de residencia en horas y días de carbonización. Con el incremento de la

temperatura se produce la ruptura de los enlaces glucosídicos y por consiguiente una despolimerización parcial del componente celulósico de la madera. Las reacciones ocurridas a 100°C son endotérmicas debidas a la eliminación de la humedad. La emisión de gases se produce principalmente entre 200 y 400°C, excepto para el CO y CO₂ que se liberan a más altas temperaturas (Flores y Quinteros, 2008).

En el intervalo de 250 a 350°C se produce la fase cuantitativa más importante de la pirólisis. La hemicelulosa se descompone fácilmente, entre 220°C y 315°C, se da su mayor pérdida en peso, con un máximo en 268°C y su residuo sólido a los 900°C es del 20%. La celulosa se degrada a temperaturas más altas entre 315 y 400°C con una pérdida de peso máxima a 355°C, cuando supera los 400°C quedan niveles de celulosa muy bajos (6.5%). La lignina es más resistente a la degradación ya que necesita 0.14% ocurre entre los 160°C y los 900°C, el residuo final es del 45%, lo que permite que se genere un residuo sólido muy alto, por tanto, se considera que el contenido de lignina influye en el rendimiento del carbón obtenido. El proceso de carbonizado en la lignina y hemicelulosa es altamente exotérmico, mientras que la volatilización de la celulosa es endotérmica (Aragón, 2009; Martínez, 2009).

Cuando en el proceso de carbonización la temperatura se incrementa por arriba de los 1000°C, la reactividad del carbón durante el proceso de gasificación disminuye, ya que se destruyen los centros activos de la superficie. El número de átomos en la arista es reducido por reordenamiento y los heteroátomos (los que no son carbón) abandonan la estructura, en gran medida por la desvolatilización de compuestos de nitrógeno y oxígeno, sobre todo por abajo del 50% de pérdida por combustión del carbón gasificado (Márquez, 2009).

Las temperaturas y el tiempo de carbonización influyen en el tipo de producto que se puede obtener. En altas temperaturas el proceso es más rápido y el rendimiento del carbón es menor; por tanto, cuando el carbón es el principal producto a obtener en la pirólisis debe efectuarse a bajas velocidades de calentamiento y a temperaturas finales moderadas. Cuando el pico de la temperatura supera los 200°C, el residuo sólido

pirolítico puede cambiar a madera tostada, torrefactada, pyrochar, carbón convencional o a coque (Serrano, 2009).

a) Torrefacción: en este proceso se calienta la biomasa en un pico de temperatura hasta 240 y 260°C. Para un volumen de materia bruta de 1 cm³ el tiempo de residencia requerido es de 2 h a 230°C, 1 hora a 250°C y 0.5 h a 280°C. Durante estos intervalos de tiempo-temperatura la hemicelulosa es térmicamente degradada pero no destruida. Los grupos acetilos son partidos y el ácido se convierte en un producto gaseoso. Se caracteriza por un poder calorífico de 20,900 kJ kg⁻¹ y un contenido de carbón fijo entre 35 y 40%. No es fermentable, ni higroscópico (Serrano, 2009).

b) Carbón convencional: el carbón se obtiene al calentar la biomasa con oxigenación restringida a temperaturas que varían de 400 a 700°C (Roman, 1992; Aragón, 2009). Es un producto sólido, frágil y poroso con un alto contenido de carbono alrededor de 80% y un poder calorífico entre 29 y 35 kJ kg⁻¹, que es muy superior al de la madera cuyos valores oscilan entre el 12 y 21 kJ kg⁻¹ (FAO, 2009). Tiene alta reactividad, baja resistencia mecánica, bajo contenido de cenizas y alto poder calorífico (Sanabria *et al.*, 2007).

2.3 Infraestructura para la producción del carbón vegetal

Los avances científicos han permitido el desarrollo de tecnologías más eficientes que convierten la biomasa en energía disponible para el hombre (Omer, 2007). Sin embargo, los equipos utilizados para la producción del carbón han tenido diferentes diseños en función de los recursos y de las necesidades de las comunidades (Compeán y Quiñones, 2003). Existen métodos tradicionales como los hornos de tierra o parvas, también hay métodos industriales como los hornos de ladrillo, metálicos transportables y retortas (Martín, 1989; Stassen, 2002; Pascal, 2005).

2.3.1 Métodos tradicionales

Mediante métodos tradicionales como fosas de tierra o método de parvas se ha producido carbón durante miles de años. La pirolisis de la madera se desarrolla en forma lenta, la temperatura que alcanza no es superior a 500°C. La conversión de la madera en

carbón es baja, de hecho el contenido energético del combustible disminuye (Flores y Quinteros, 2008).

a) Fosas de tierra: según Stassen (2002), este método fue ampliamente utilizado a principios del siglo XX. Consiste en la utilización de tierra para aislar la leña del oxígeno, se coloca la leña en pozos excavados en la tierra, se cubría con suelo y se les prende fuego. Actualmente, continúan en operación con algunas modificaciones, en pozos excavados en el suelo se introduce la leña, posteriormente, se tapa con piezas metálicas en la parte superior (Figura 2) quedando la leña completamente aislada del oxígeno y finalmente se les prende fuego en la entrada del aire (Guardado *et al.*, 2010).



FIGURA 2. Método de fosa de tierra para la elaboración de carbón vegetal.

b) Método de parvas: en estos tipos de hornos se apila la madera sobre el suelo y se cubre la parva con tierra; es similar al método de fosa de tierra, ya que la madera a carbonizar se encierra en una cámara hecha con suelo y aislada el aire, sus dimensiones son aproximadamente de 4 m de diámetro en la base y de 1.0 a 1.5 m de altura (FAO, 1983). La parva es utilizada ampliamente en zonas agrícolas, donde las fuentes de leña pueden estar dispersas y se quiere producir el carbón cerca de los pueblos (Figura 3).



FIGURA 3. Horno de parva para la producción de carbón vegetal.

El impacto ambiental al utilizar los métodos tradicionales es significativo. La reabsorción del ácido piroleñoso y de las breas de desecho se infiltran en el suelo utilizado durante el proceso (Guardado *et al.*, 2010).

2.3.2 Métodos tecnificados o industriales

En los métodos modernos la producción es a mayor escala, se obtienen mayores rendimientos y mayor calidad del carbón.

a) Hornos de ladrillo: cuando son construidos y operados correctamente, representan uno de los métodos más efectivos para la producción de carbón vegetal. Estos hornos requieren una inversión moderada y poca mano de obra. Los rendimientos pueden ser de 9 a 10 toneladas de carbón vegetal (Figura 4). La calidad del carbón obtenido cumple con las especificaciones para todo uso industrial y doméstico (FAO, 1983; Flores y Quinteros, 2008).



FIGURA 4. Horno de ladrillo para la elaboración de carbón vegetal.

b) Hornos metálicos transportables: con este tipo horno la llama está en contacto directo con la leña que se va a carbonizar. El diseño del horno es cilíndrico, sencillo, es metálico, consta de dos piezas y se utiliza una tapa de metal. Durante el proceso de pirolisis se liberan los gases de desecho y se controla la entrada de aire por medio de un conjunto de chimeneas (Figura 5). Para facilitar la carbonización también cuentan con chimeneas en la sección inferior del horno. Al cerrar las entradas de aire de la parte inferior se logra una hermeticidad total, por tanto, el proceso se realiza con total ausencia de oxígeno (Guardado *et al.*, 2010). Tienen la ventaja de que las piezas pueden ser rodadas para ser transportados hasta el lugar donde se encuentra la madera, de esta forma durante el abastecimiento la materia se moviliza de distancias mínimas. Un inconveniente de este tipo de hornos es su vida útil, pudiendo alcanzar de dos a tres años (Martín, 1989).



FIGURA 5. Horno tipo metálico transportable para la fabricación de carbón vegetal.

c) **Retortas:** con este equipo los gases generados durante el proceso de pirólisis pueden ser reutilizados, de tal modo que el consumo energético de la materia prima es bajo (Figura 6), también se reduce la liberación de sustancias contaminantes a la atmósfera (Pascal, 2005). Con este sistema se asegura producir una tonelada de carbón por cada 2 m³ de leña (Rodríguez, 1989). Guardado *et al.*, (2010), describen que este proceso de carbonización consiste en introducir la materia prima a una cámara aislada donde se calienta indirectamente mediante un quemador de gases. Los productos gaseosos resultantes de la destilación de la madera se llevan hasta un condensador donde se producen tres funciones que se detallan a continuación (Martínez, 2009). En la Figura 6 se muestra el diseño de un horno tipo retorta elaborado por Flores y Quinteros (2008).

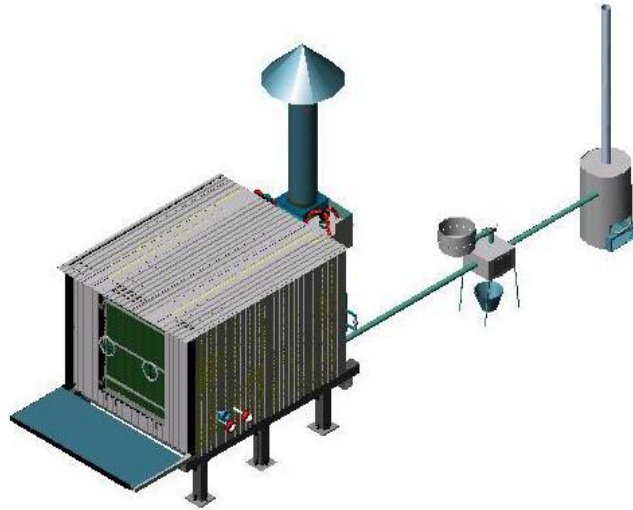






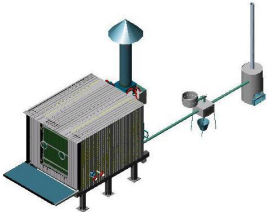
FIGURA 6. Diseño de horno tipo retorta para la producción de carbón vegetal.

La secuencia durante el proceso de pirólisis mediante hornos tipo retorta queda simplificado de la siguiente manera:

1. Se almacena una fracción en estado gaseoso que contiene principalmente gases combustibles de monóxido de carbono, que se usará para calentar el sistema.
2. La fracción líquida principalmente constituida por agua y en la que se encuentran diluidos gran cantidad de sustancias como alcoholes, cetonas, fenoles, aldehídos, etc.
3. La fracción semi-sólida con textura pastosa (alquitrán), está constituida por una mezcla de productos, principalmente hidrocarburos.

Actualmente, existen diferentes tipos de equipos para la producción de carbón vegetal. Sin embargo, es importante adaptarse a un sistema de producción sustentable, con la finalidad de obtener ventajas ambientales, sociales e impulsar el desarrollo económico e industrial (Villalón y Carrillo, 2010). En el Cuadro 1 se muestran los diferentes tipos de métodos para la producción de carbón así como las ventajas y desventajas de cada método. El Cuadro 2 presenta los rendimientos de cada tipo de horno reportados por Flores y Quinteros, (2008).

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de producción de carbón vegetal.

| Hornos | Ventaja | Desventaja |
|--|--|--|
| <p>Fosa</p>  | <ul style="list-style-type: none"> ➢ Materia prima local ➢ Inversión mínima ➢ Buen aislamiento térmico ➢ Fácil de operación ➢ Carbón relativamente limpio ➢ Las condiciones atmosféricas influyen en el proceso | <ul style="list-style-type: none"> ➢ Instalación fija ➢ Requiere de suelo profundo ➢ Es difícil controlar la circulación de gases ➢ Contaminación importante ➢ Requiere mucho esfuerzo físico de los operadores ➢ Bajos rendimientos |
| <p>Parva</p>  | <ul style="list-style-type: none"> ➢ Movilidad ➢ La inversión es mínima ➢ Materias primas locales ➢ Se recomienda colocarlo en suelo arcilloso ➢ Capacidad ajustable ➢ No hay descarga | <ul style="list-style-type: none"> ➢ Se requiere intensiva mano de obra ➢ Es difícil controlar las condiciones atmosféricas ➢ Carbón de calidad heterogénea ➢ Bajos rendimientos ➢ Contaminación importante |
| <p>Colmena brasileño</p>  | <ul style="list-style-type: none"> ➢ Materia prima local ➢ Buen aislamiento térmico ➢ Fácil de operación ➢ Requiere de poca mano de obra ➢ Se obtiene carbón de calidad industrial y doméstico ➢ Se considera uno de los métodos más eficientes ➢ Largo tiempo operativo ➢ No es sensible a condiciones atmosféricas | <ul style="list-style-type: none"> ➢ Requiere de inversión moderada ➢ Para su construcción se requiere de personal capacitado ➢ Instalación fija ➢ Su enfriado es lento ➢ Costos de descarga ➢ Contaminación importante |
| <p>Metálico transportable</p>  | <ul style="list-style-type: none"> ➢ Movilidad hasta el lugar donde está la materia prima ➢ Enfriado rápido ➢ Fácil de operar ➢ Carbón limpio y homogéneo ➢ No es sensible a condiciones atmosféricas | <ul style="list-style-type: none"> ➢ Inversión moderada ➢ Vida útil de dos a tres años ➢ Capacidad determinada ➢ Contaminación importante |
| <p>Retorta</p>  | <ul style="list-style-type: none"> ➢ Calidad homogénea y ajustable ➢ Alto rendimiento ➢ Automatización ➢ Alto rendimiento energético ➢ No hay contaminación | <ul style="list-style-type: none"> ➢ Inversión considerable ➢ Alta capacitación técnica ➢ Transporte de madera |

Cuadro 2. Rendimientos de carbón producido en diferentes tipos de hornos.

| Tipo de horno | Rendimiento (%) |
|----------------------|------------------------|
| Parva | 16.6 |
| Fosa | 22.2 |
| Ladrillo | 47.6 |
| Metálico | 31.4 |
| Retorta | 83.3 |

Los sistemas para la producción de bioenergía comprende varias fases que van desde el derribo, preparación y transporte de las materias primas hasta su transformación en combustible, distribución a los consumidores y su utilización para la producción de energía (Thrän, 2002).

2.4 Factores que influyen en el rendimiento y calidad de carbón

Los rendimientos de la carbonización son variados debido a diversos factores, entre los que destacan: equipos y procesos utilizados, densidad de las especies destiladas, composición química de la madera, grado de acotamiento, contenido de resinas y contenido de humedad (Romahn, 1992).

La composición química de los elementos orgánicos de la biomasa es importante en el desarrollo de procesos de producción de combustibles derivados de la madera. La madera está constituida principalmente de tres grupos de compuestos que conforman la pared celular que son la celulosa, hemicelulosa y lignina (Demirbas, 2003; Di Blasi, 2008). Un cuarto grupo que se encuentran en menor cantidad y lo forman las sustancias extraíbles que se caracterizan por su baja masa molecular y las sustancias minerales que se encuentran en proporciones muy reducidas. La cantidad de cada componente puede presentar variaciones interespecíficas e intraespecíficas (Rojas y Barraza, 2009).

El contenido de lignina presente en la madera influye ampliamente en el rendimiento gravimétrico y en el porcentaje de carbón fijo. La estructura que presenta es compleja, lo que hace que sea más resistente a la descomposición térmica en comparación con la celulosa y la hemicelulosa. Por otra parte, la lignina influye en gran medida en el

porcentaje de carbono que presenta el producto de la carbonización, posee un 65% de carbono elemental, por tanto, es la que más aporta al carbón vegetal. La presencia de un alto porcentaje de extractivos y lignina proporcionan al carbón una alta densidad y mayor resistencia a los esfuerzos físico-mecánicos (Di Bladis, 2008).

La resistencia térmica de los constituyentes químicos de la madera está muy relacionada con sus estructuras; es decir, cuando más complejo, rígido, inaccesible, cerrado y cristalino sea la estructura es más estable térmicamente (Goldstein, 1979). Por lo anterior, se tiene que la fragmentación de la lignina es lenta y ocurre a temperaturas superiores a 500°C, la pérdida de peso que experimenta es resultado de la masa carbonosa que la forma. Por otra parte, la degradación de la celulosa es rápida y ocurre de los 300 a 350°C, y se reduce aproximadamente en un 85% de su masa. En cambio, la hemicelulosa se fragmenta a una temperatura aproximada de 225°C, por ello se considera como el componente menos estable, cuando alcanza los 500°C la degradación térmica que experimenta es completa.

La selección de las especies utilizadas deben cumplir con las características de aceptabilidad, calidad, productividad, redituabilidad y adaptabilidad (Gutiérrez y Villalón, 2001). Además, las características que se deben de considerar son la densidad básica y el factor volumen sólido, ya que estos definen la masa del combustible de la madera, importante factor para determinar la cantidad de energía por unidad de volumen (Enciso, 2007).

La producción de carbón de buena calidad depende principalmente de la especie de madera, dimensiones del material, tipo de horno y secuela de carbonización (Sprenger, 1995). Sin embargo, el concepto de calidad depende de la granulación, contenido de humedad, cenizas, carbón fijo y del gusto del consumidor (Camps y Martín, 2008). Los mercados europeo y asiático regulan la calidad del carbón con normas basadas en las características fisicoquímicas (Cuadro 3), color, sonido, facilidad de ignición, sabor y granulometría (Cuadro 4). En cambio, en los Estados Unidos de Norteamérica la calidad

se basa en la granulación, se debe evitar la producción de chispas, presencia de polvo e impurezas (Stassen, 2002).

Cuadro 3. Estándares de calidad de acuerdo a las características fisicoquímicas del carbón vegetal para uso doméstico.

| Mercado | Norma | Pureza química | | | |
|----------------|---------------|--------------------|------------------|----------------|----------------|
| | | Carbón fijo (%) | Volátiles (%) | Cenizas (%) | Humedad (%) |
| Bélgica | NBN M11-001 | 75 | 12 | - | 7.0 |
| Francia | NF N°846 E | 75 | 12 | - | 7.0 |
| Alemania | DIN 51749 | 78 | 16 | 6 | 8.0 |
| Rusia | GOST 7657-84 | 77 | 14 | 3 | 6.0 |
| Serbia | SRPS D.B9.020 | 80 | 5 | 5 | 10.0 |
| Estados Unidos | DIN EN 1860-2 | 75 | 9 | 8 | 8.0 |
| Japón | - | 76 | 12 | 4 | 7.5 |

Cuadro 4. Estándares de calidad de acuerdo a la granulometría del carbón vegetal para uso doméstico.

| Mercado | Norma | Pureza química | | | Humedad (%) |
|----------------|---------------|----------------|-------------------------|---------------|----------------|
| | | >20 mm (%) | >10 mm ≤20 mm (%) | ≤10 mm (%) | |
| Bélgica | NBN M11-001 | 75 | 19 | 6 | 7 |
| Francia | NF N°846 E | 19 | 19 | - | - |
| Alemania | DIN 51749 | 6 | - | - | - |
| Rusia | GOST 7657-84 | 77 | 14 | 3 | 6 |
| Estados Unidos | DIN EN 1860-2 | 20 | 10 | - | 8 |

En México, a pesar de la importancia de la producción a nivel nacional, se carece de estándares, prácticas y normas adecuadas que permitan determinar la relación rendimiento-calidad y clasificación del producto. Según Arias *et al.*, (2006), el consumidor identifica la calidad del carbón de acuerdo a la presentación: granel o

empaquetado, con marca o sin marca. En cambio García (2010), indica que la calidad se clasifica por el sonido metálico, color tonos azules brillantes, tamaños robustos con dimensiones mayores a 5 cm y limpieza de impurezas como piedras, suelo o cualquier otro elemento.

2.5 Producción y comercialización del carbón vegetal

La producción mundial de carbón en el 2009 fue de 47 millones de toneladas métricas, la principal producción fue en África con el 63% de la producción. Las exportaciones de África ascienden a 2 millones de toneladas que representa el 4% de la producción mundial. Los principales países exportadores son Paraguay, India, Indonesia, Argentina y Somalia. Los principales importadores de carbón son Alemania, China, Malasia, Japón y La República de Corea los cuales comercializan el 38% del mercado global (FAOSTAT, 2011). El consumo de carbón vegetal en los países desarrollados se ha incrementado en los últimos años debido a que han adoptado nuevas políticas energéticas (Trosero, 2002).

En México en el año 2007 el producto interno bruto (PIB) del sector forestal fue de 29,365 millones de pesos, lo que representa en la economía nacional el 0.4% del PIB nacional (SEMARNAT, 2007). Dentro de la balanza comercial el carbón es de los principales productos al presentar un superávit de 7.8 millones de dólares (SEMARNAT, 2007). La producción de carbón vegetal en México, se realiza en zonas rurales mediante conocimientos tradicionales; principalmente, para su comercialización en las zonas urbanas (Arias *et al.*, 2010). La producción de carbón vegetal a nivel nacional es de 326,826 m³ rollo. Los principales estados productores en el país son: Sonora con 36%, Tamaulipas con 29%, Durango con 14%, Jalisco 9%, y Guanajuato con 7% (SEMARNAT, 2007). El mayor consumo de carbón se encuentra en las zonas urbanas del país; principalmente, el área metropolitana de la Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara, Tijuana, Ciudad Juárez, Torreón, Gómez Palacio y Chihuahua (Arias, 2010). Desafortunadamente, se carece de estándares, prácticas y normas adecuadas, que permitan obtener la mejor relación rendimiento-calidad que reúnan las necesidades de los consumidores que lo demandan (García, 2010).

En México los principales problemas que enfrenta la cadena productiva del carbón son los bajos rendimientos en la carbonización, que se reflejan en altos costos de producción y altos desperdicios de los recursos. Además, no existen normas que regulen el proceso de producción y la calidad del carbón obtenido en los diferentes sistemas de producción que les permita a los productores aumentar su competitividad en los mercados internacionales.

La utilización del carbón es muy diversa, ya que se puede emplear en sectores industriales como la química, explosivos, cristalería, pegamentos, metalurgia, productos farmacéuticos, pigmentos, industria del plástico, alimentos para animales, caucho, remediación de suelos y para uso doméstico (Enciso, 2007).

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar el proceso de producción de carbón vegetal de residuos de *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl., en hornos tipo colmena brasileño.

3.2 Objetivos específicos

Determinar la velocidad del proceso de carbonización con residuos forestales de *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl., en hornos tipo colmena brasileño.

Determinar los rendimientos del carbón vegetal producido a partir de residuos forestales de *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl., en hornos tipo colmena brasileño.

Evaluar la calidad del carbón vegetal producido a partir de residuos forestales de *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl., en hornos tipo colmena brasileño.

4. HIPÓTESIS

El rendimiento y calidad del carbón vegetal elaborado a partir de ramas y leña cuarteada de *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl., en hornos tipo colmena brasileño dependen del tipo de materia prima, de un adecuado control de la temperatura y tiempo del proceso de carbonización.

5. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, los sistemas sustentables de producción de energía a nivel mundial promueven la aplicación de nuevas tecnologías eficientes con la finalidad de obtener ventajas ambientales, sociales e impulsar el desarrollo económico e industrial. Los residuos de los aprovechamientos forestales permiten elaborar productos energéticos con un bajo contenido de azufre y nitrógeno. El uso de estos, minimizan los problemas ambientales ocasionados por la utilización de combustibles fósiles. En México, la producción de carbón vegetal se realiza mediante conocimientos tradicionales en zonas rurales y su comercialización se realiza en las zonas urbanas. El principal problema que enfrenta la cadena productiva del carbón son los bajos rendimientos en la carbonización, que se reflejan en altos costos de producción y poca eficiencia en el uso de los recursos. Además, no existen normas que regulen el proceso de producción y la calidad del carbón obtenido en los diferentes sistemas que permita a los productores aumentar su competitividad en los mercados internacionales.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Ubicación del área de estudio

El trabajo de campo se realizó en la planta Noram de México, S. A. de C. V., localizada en una fracción del Predio Particular Ciénega de Ibarra Lote 6, ubicado en el km 14 del camino rural Navíos-Regocijo, en el Municipio de Durango, Durango (Figura 7).

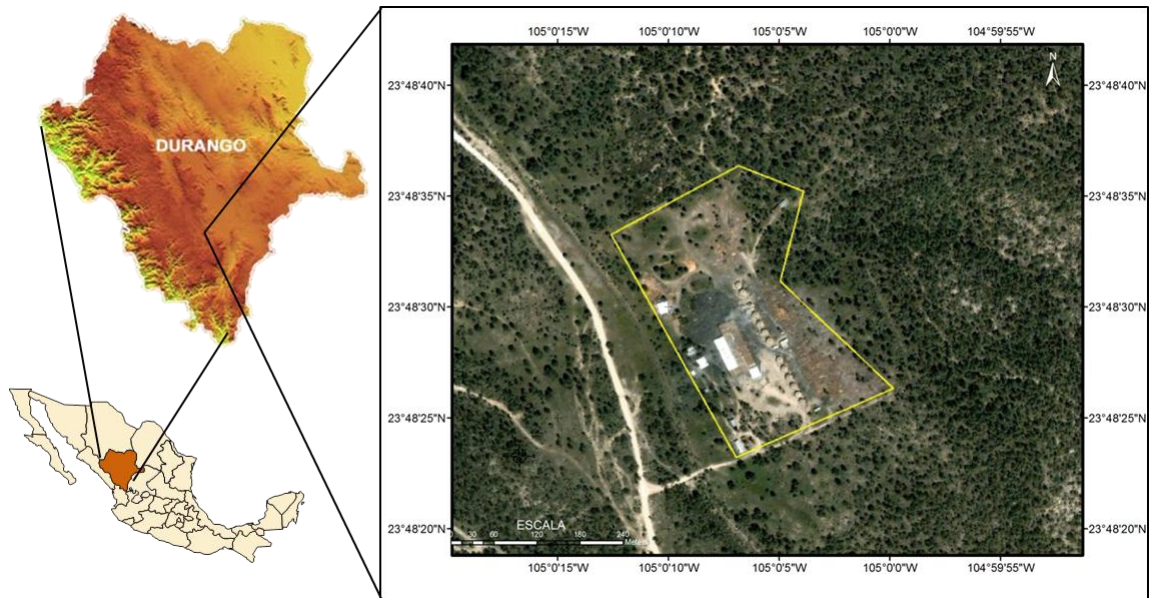


FIGURA 7. Localización de las instalaciones de la empresa Noram de México.

6.2 Selección del material experimental

El material experimental se obtuvo del paraje Ladera Mesa de Jaura, Durango, Dgo. Con ubicación geográfica $24^{\circ} 40' 13.69''$ N y $104^{\circ} 57' 46.97''$ O, altitud de 2588 m y exposición norte. Los residuos seleccionados fueron colectados después de tres meses de realizado el aprovechamiento forestal (Figura 8).



FIGURA 8. Traslado de residuos forestales a la planta NORAM de México.

6.3 Tratamientos evaluados

Se evaluaron dos tratamientos consistentes en dos tipos de materia prima de áreas bajo aprovechamiento forestal: a) residuos de ramas y b) leña cuarteada (Figura 9). Los residuos ensayados fueron ramas con 2 a 10 cm de diámetro y 30 a 35 cm de longitud y leña con avanzado grado de descomposición que fue cuarteada de trozas con diámetro de 15 a 20 cm y 30 a 35 cm de longitud.



FIGURA 9. Residuos obtenidos de los aprovechamientos forestales a) ramas y b) leña cuarteada.

Se seleccionó al azar 21 muestras de cada tipo de residuo y el proceso se desarrolló en tres repeticiones. Los hornos fueron del tipo colmena brasileño, ya que se consideran más eficientes que los hornos tradicionales (Flores y Quinteros, 2008; Arias *et al.*,

2010). Se caracterizan por su forma circular y están contruidos de ladrillos, techo en cúpula (Figura 10), diámetro de 7.06 m, altura de 3.8 m y cuentan con 36 huidos ubicados alrededor del horno para intercambio de aire y su capacidad promedio es de 81 m³.

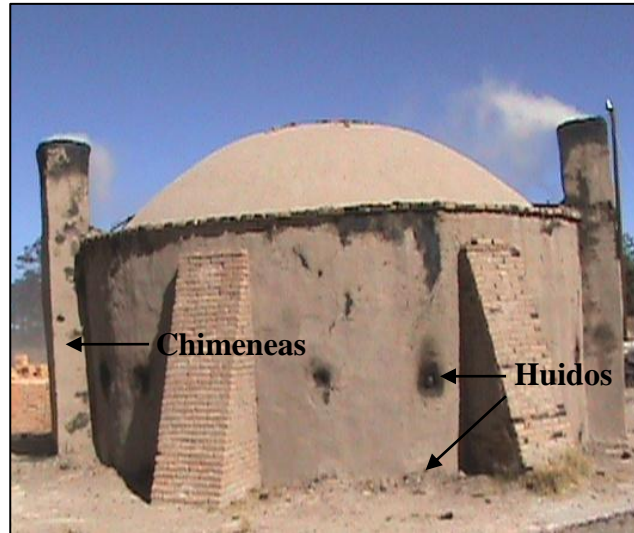


FIGURA 10. Características de horno tipo colmena brasileño

6.4 Determinación de volumen

El volumen total de los residuos forestales de ramas y leña cuarteada se determinó antes de colocarlos en los hornos colmena brasileño (Figura 11). El cálculo consistió en medir el largo, ancho y altura de la estiba, posteriormente, se aplicará el factor de apilamiento del 60% (García, 2010).



FIGURA 11. Determinación del volumen de leña cuarteada.

6.5 Determinación de propiedades de la materia prima

Se seleccionó al azar 21 muestras de cada tipo de residuo en cada una de las tres repeticiones. Posteriormente, se determinó el contenido de humedad a cada muestra con un xilohigrómetro marca Delmhorst J-2000 (Figura 12), en tres diferentes secciones a lo largo de cada pieza (Baettig, 2001).



FIGURA 12. Medición de contenido de humedad por medio del xilohigrómetro.

6.6 Proceso de carbonización

Cada repetición consistió en colocar siete muestras identificadas con clavos de diferente tamaño y alambre galvanizado, lo anterior para referenciar y comparar por nivel del horno las variables de la muestra (Figura 13). El horno se dividió en tres niveles según la altura.



FIGURA 13. Muestra identificada con clavo y alambre galvanizado.

El encendido de los hornos inició en la parte superior en forma simultánea (Figura 14). El proceso de carbonización de los hornos se realizó en sentido descendente y horizontal. Con las chimeneas se controló la expulsión de gases productos de la carbonización, y el aire que entra por los huidos.



FIGURA 14. Encendido del horno por la parte superior.

La temperatura ($^{\circ}\text{C}$) de cada horno se monitoreó en intervalos de una hora durante todo el proceso con termopares Omega (Figura 15); además, se determinó el tiempo de

carbonización (h) y se registró el color de las emisiones de humos y el período en el que se presentaron durante la carbonización.



FIGURA 15. Medición de la temperatura dentro del horno con termopares.

Las muestras de carbón recuperadas de cada horno se colocaron en bolsas de plástico para evitar la absorción de humedad durante el traslado al laboratorio para obtener las características fisicoquímicas (Figura 16).



FIGURA 16. Muestras de carbón vegetal obtenidas después del proceso de carbonización.

El producto restante se colocó en la bodega a granel por un día para asegurar el enfriado total del carbón antes de ser empacado y determinar su rendimiento y calidad granulométrica.

6.7 Características fisicoquímicas del carbón

Se realizaron dos tipos de pruebas fisicoquímicas para caracterizar y determinar la calidad del carbón producido por cada tipo de residuo: análisis inmediatos y análisis elementales. Los análisis inmediatos consistieron en determinar el contenido de humedad (%), material volátil (%), cenizas (%) y carbón fijo (%) con base a la Norma Internacional ASTM D 1762 – 84 (Reaprobada, 2001). Con el análisis elemental se determinó el contenido de carbono (%), hidrógeno (%) y nitrógeno (%) con base en la norma ASTM D 5373 (Velasco *et al.*, 2008; Rojas y Barraza, 2009; Romo *et al.*, 2011). Para realizar estas pruebas se utilizó el equipo LECO CHN628 (LECO Corporation, Michigan, Estados Unidos). La cantidad de oxígeno (%) se determinó al restar del total de la masa libre de ceniza, la suma del contenido de carbono (%), nitrógeno (%), e hidrógeno (%) según Baldock y Smernik (2007) y Conesa y Domene (2011). El azufre (%) se determinó con el analizador elemental TruSpec® modulo S (LECO Corporation; Michigan, Estados Unidos). El poder calorífico (J g^{-1}) se determinó con el calorímetro Isoperibol para altas temperatura marca LECO Ac500 (LECO Corporation; Michigan, Estados Unidos).

6.8 Calidad granulométrica

Para caracterizar la calidad granulométrica se seleccionaron después del empaque de cada repetición 100 bolsas del carbón de 2.5 kg. De cada bolsa se clasificó el carbón de acuerdo a su dimensiones como: clase 1 (<2.0 cm), clase 2 (2 cm a 5 cm), clase 3 (5 cm a 10 cm) y clase 4 (10 cm a 15 cm); posteriormente, se pesó (kg) con la balanza electrónica digital marca Tor-Rey con capacidad máxima de 20 kg y precisión de 0.001 kg (Figura 17).



FIGURA 17. Clasificación granulométrica de carbón elaborado a partir de residuos de *Quercus sideroxylla*. A es clase 1 (<2.0 cm), B es clase 2 (2 cm a 5 cm), C es clase 3 (5 cm a 10 cm) y D es clase 4 (10 cm a 15 cm).

6.9 Rendimiento y tizos obtenidos

El rendimiento del carbón se determinó mediante el volumen de la leña total que se utilizó en el proceso de producción del carbón, posteriormente, se multiplicó por 0.6 ya que se aplicó un factor de 6.0 que corresponde el coeficiente de apilamiento, este valor fue dividido entre el peso del carbón obtenido (Whiteman *et al.*, 2002; Picardo *et al.*, 2008). Los resultados se expresaron en metros cúbicos por tonelada métrica ($\text{m}^3 \text{Tm}^{-1}$). La cantidad de tizos obtenidos se determinó en m^3 de carbón producido (Figura 18).



FIGURA 18. Tizos obtenidos durante el proceso de carbonización.

6.10 Análisis estadístico

Los datos obtenidos, se analizaron estadísticamente con los procedimientos PROC MODEL y PROC TTEST del sistema estadístico SAS/ETS® (SAS INSTITUTE INC., 2000). Para describir la relación entre la temperatura y tiempo de carbonización se ajustó el siguiente modelo, el cual suele caracterizar bien dicha relación (Challice y Clarke, 1965):

$$y(T) = \alpha \left(-0.5 \left(\frac{t - x_0}{\beta_0} \right)^2 \right)$$

donde:

T = temperatura (°C)

α = parámetro que representa la temperatura pico

t = tiempo (h)

x_0 = posición del punto pico de la temperatura

β_0 = parámetro que describe el ancho del pico a mitad de la máxima temperatura

Dado que los datos de los análisis inmediatos, elementales y la calidad granulométrica son valores porcentuales, se transformaron con la función de la raíz cuadrada de arcoseno de p , donde: p = a la proporción de la variable dependiente (Scheffler, 1981). La significancia de los resultados obtenidos se determinó mediante un diseño experimental con un criterio de clasificación con arreglo factorial siendo A y B el tipo de residuo

(ramas y leña cuarteada) con tres niveles de posición (superior, media e inferior) en el horno (Steel y Torrie, 1980). En los casos donde se observaron diferencias significativas se realizó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey (Steel y Torrie, 1980). Los datos del rendimiento ($\text{m}^3 \text{Tm}^{-1}$), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y tiempo (h) de carbonización final se analizaron con una prueba de t de Student. Para expresar la variación de las medias respecto a la variación total de las observaciones se determinó el error estándar de las muestras (Sígala, 2009).

$$S_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{S_y^2}{n} \left(1 - \frac{n}{N}\right)}$$

Donde:

$S_{\bar{y}}$ = error estándar de la media

S^2 = desviación estándar

n = número de muestras

N = total de unidades de muestreo en toda la población

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Temperatura y tiempo de carbonización

Los valores obtenidos del coeficiente de determinación al relacionar la temperatura con el tiempo de carbonización en el proceso de la leña cuarteada y ramas fueron de $R^2=0.99$ y $R^2=0.98$, respectivamente. Lo anterior indica que la varianza del aumento de la temperatura respecto al tiempo de carbonización en leña cuarteada y ramas es explicada en un porcentaje de 99% y 98%, respectivamente. El proceso más veloz se presentó con el uso de residuos de ramas, al presentar humos de color blanco en los huidos a las dos horas de encendido; la temperatura dentro del horno en esta condición fue de 40°C (Figura 19).

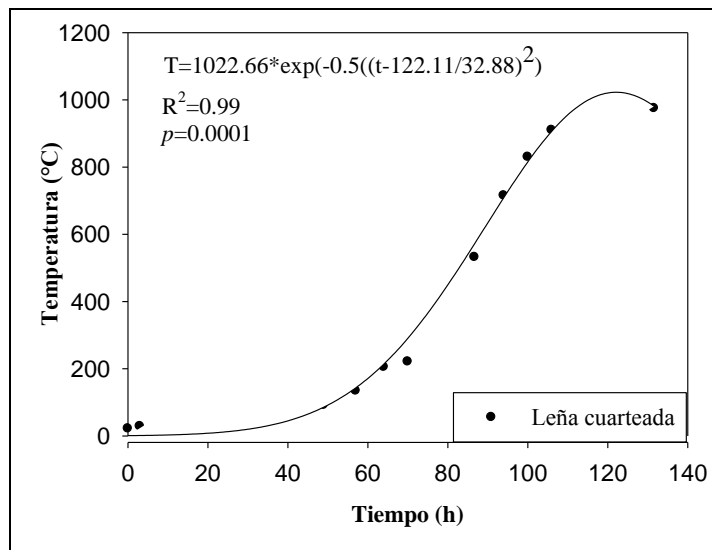


FIGURA 19. Cambio de temperatura en función del tiempo el proceso carbonización de leña cuarteada de *Quercus sideroxylla* en hornos tipo colmena brasileño. Los puntos representan los valores observados, mientras que la línea continua representa a los valores estimados.

La coloración blanca de las emisiones se debe a que inició la fase endotérmica cuando la leña comenzó a absorber calor y comenzó la evaporación de la humedad (Figura 20). En cambio, el horno con leña cuarteada fue más lento al requerir 50 horas para presentar humo color blanco y aumentar la temperatura dentro del horno a 100°C . Esta diferencia se atribuye a la relación peso-volumen del combustible e influye en su inflamabilidad y combustibilidad; es decir, a menor peso y menor volumen la ignición y la velocidad de

carbonización aumenta (Rothermel 1972; Deeming y Brown, 1975; Rentería *et al.*, 2005).



FIGURA 20. Liberación de humos color blanco por las chimeneas.

El horno con ramas después de 55 horas de encendido aumentó la temperatura a 255°C (Figura 21); liberó abundante humo color amarillento por las chimeneas, el humo al condensarse generó un líquido de color ámbar en los huidos. En cambio, la temperatura del horno con leña cuarteada aumentó de 221°C a 416°C después de 70 a 76 horas de encendido, el color del humo se tornó una combinación amarillo oscuro (Figura 22).

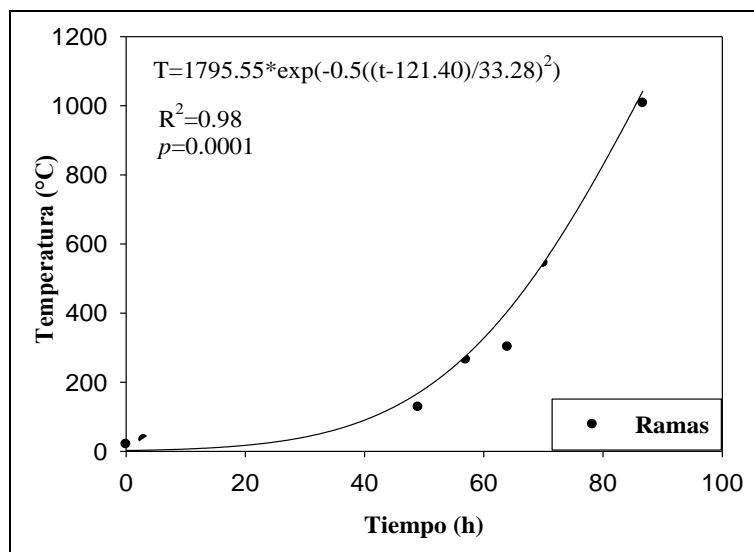


FIGURA 21. Cambio de la temperatura en función del tiempo durante el proceso carbonización de ramas de *Quercus sideroxylla* en hornos tipo colmena brasileño. Los puntos representan los valores observados, mientras que la línea continua representa a los valores estimados.

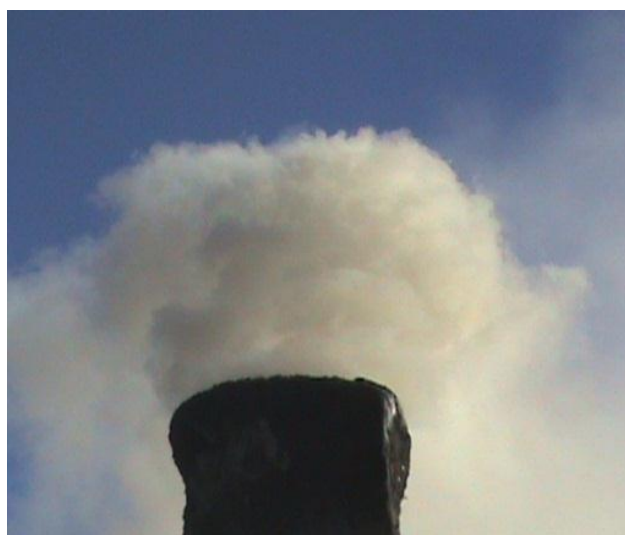


FIGURA 22. Humo color amarillo oscuro eliminado después de 70 a 76 h de encendido el horno.

El humo producido, condensó un alquitrán negro que se observó cuando emanó a través de las aperturas inferiores del horno y se acumuló en el piso (Figura 23). El color del humo, la cantidad de energía calorífica liberada son resultado de las características del material (Rothermel 1972; Rentería *et al.*, 2005).



FIGURA 23. Alquitran negro liberado a través de los huidos inferiores del horno al utilizar residuos de ramas y leña cuarteada de *Quercus sideroxyla*.

Aragón, (2009), observó que a los 220°C y 350°C se produce la fase más importante de la carbonización, se libera energía mediante la ruptura de los enlaces glucosídicos y por consiguiente se propicia una despolimerización parcial del componente celulósico de la madera y se libera ácido acético, alquitranes y gases no condensables (Flores y Quinteros, 2008). Rowell (1991), señaló que los componentes de la pared celular se descomponen químicamente a los 200°C, e indica que la hemicelulosa es la más susceptible a la degradación, mientras que la celulosa y la lignina por ser más resistentes a la degradación contribuyen más a la formación del carbón. El proceso de carbonizado de la lignina y hemicelulosa es altamente exotérmico, mientras que la volatilización de la celulosa es endotérmica (Yang *et al.*, 2007; Aragón, 2009; Martínez, 2009). Algunos autores indican que el proceso de carbonización comienza a los 290°C (Şensöz, 2003; Moura *et al.*, 2007). Blanco *et al.*, (2007), establece que de 300°C a 400°C se alcanza el punto de ignición.

Los resultados de la prueba de comparación de medias de la evaluación de la temperatura y el tiempo final de la carbonización indican que existen diferencias significativas ($p < 0.0255$ y $p < 0.0496$) entre residuos (Cuadro 5). El proceso de carbonización del horno con ramas terminó 86.7 h después del encendido, y alcanzó una

temperatura final de 1007°C, en este momento se observó la liberación de humo azul claro y se selló el horno (Figura 24).

Cuadro 5. Temperatura final y tiempo total del proceso de carbonización de ramas y leña cuarteada de *Quercus sideroxylo* en horno colmena brasileños.

| | Ramas | Leña cuarteada | Valor | |
|------------------------|-------------|----------------|----------|----------|
| | | | <i>t</i> | <i>p</i> |
| Temperatura final (°C) | 1,007.6±8.7 | 975.3±2.9 | 12.06 | <0.0255 |
| Tiempo (h) | 86.7±5.6 | 131.6±15.1 | 7.75 | <0.0496 |

Los valores ilustrados representan la media ± error estándar, *n*=3 repeticiones.



FIGURA 24. Humo azul claro liberado a 1007°C y sellado del horno para finalizar el proceso.

El horno con leña cuarteada continuó con el proceso hasta 131.6 h después del encendido a una temperatura de 975.3°C y el color del humo se vuelve claro con un ligero tono azul, inmediatamente, se cerraron las chimeneas del horno. Ferreira (2009), señala que existen factores que influyen en el proceso como la temperatura final de carbonización, velocidad de calefacción y el control de oxidación.

7.2 Rendimiento

Se encontraron diferencias altamente significativas en el rendimiento ($p < 0.0005$) entre los dos tipos de residuos estudiados (Cuadro 6). El mayor rendimiento se obtuvo de leña

cuarteada, al obtener $5.4 \text{ m}^3 \text{ Tm}^{-1}$; es decir, se necesitan 5.4 metros cúbicos para producir una tonelada de carbón. En cambio, el rendimiento en la producción de carbón con ramas fue menor al producir $9.7 \text{ m}^3 \text{ Tm}^{-1}$ de carbón. El bajo rendimiento observado en el horno de ramas se debe a las altas temperaturas 1007.6°C producidas dentro del horno y a las características de las ramas (diámetro de 3 a 10 cm y largo de 30 a 35 cm), ya que se consumió mayor volumen de materia prima para aumentar la temperatura del horno.

Cuadro 6. Rendimientos y tizos obtenidos del proceso de carbonización de leña cuarteada y ramas en hornos colmena brasileño.

| | Leña cuarteada | Ramas | Valor <i>t</i> | Valor <i>p</i> |
|---|-----------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|
| Rendimientos ($\text{m}^3 \text{ Tm}^{-1}$) | 5.4±0.1 | 9.2±0.2 | 424.06 | <0.0005 |
| Tizos (m^3) | 1.4±0.3 | 4.2±0.6 | 16.75 | <0.0149 |

Los valores ilustrados representan la media ± error estándar, $n=3$ repeticiones.

Argueta (2006), reportó en hornos de fosa una conversión de leña a carbón de $6.5 \text{ m}^3 \text{ Tm}^{-1}$. García *et al.*, (2009), determinó que el rendimiento del carbón de *Quercus* en hornos colmena brasileño fue de $7.5 \text{ m}^3 \text{ Tm}^{-1}$. Neves *et al.* (2011), relacionan los cambios en los rendimientos del carbón con el tamaño de la materia prima al influir en las reacciones homogéneas y heterogéneas de los alquitranes producidos que se liberan de las partículas, también, sugiere que el calentamiento rápido por diferentes tamaños de partículas favorece la producción de líquidos, al condensarse rápidamente los gases generados.

La diferencias entre los volúmenes de los tizos producidos, fueron altamente significativas ($p<0.0149$) entre los dos tipos de residuos (Cuadro 6). El mayor volumen de tizos se obtuvo de ramas con un valor de 4.2 m^3 , mientras que el horno con leña cuarteada produjo menor cantidad de tizos con 1.4 m^3 . El alto volumen de tizos obtenido en el horno con ramas refleja una carbonización heterogénea, ya que el combustible de este tipo presenta más espacios entre el material, esto facilita la circulación del aire; por tanto, propicia incrementos bruscos en temperatura y la modificación heterogénea del proceso de carbonización en diferentes zonas del horno.

7.3 Análisis inmediato

El porcentaje de humedad del carbón producido presentó diferencias significativas solo entre los tipos de residuos ($p < 0.05$, Cuadro 7). Los porcentajes de humedad no variaron respecto a la posición ni a la combinación residuo-posición, variando del 3.2% al 3.8% (Figura 25). Guardado *et al.*, (2010), reportaron que el contenido de humedad en el horno retorta, metálico tradicional y en carbón Dany fue de 6.8%, 5.6% y 4.5%, respectivamente. Serrano (2009), considera que las principales características que clasifican como un adecuado proceso térmico son el contenido de humedad y el contenido de cenizas. Los estándares de calidad del carbón para uso doméstico en países como Bélgica y Francia lo regulan a través de las Normas NBN M11-001 y NF No. 846, respectivamente, las cuales permiten un contenido de humedad máximo del 7%. En Rusia, el carbón de calidad es aquel que tiene una humedad máxima del 6% según la Norma GOST 7657-84 (Petrović y Glavonjić, 2011).

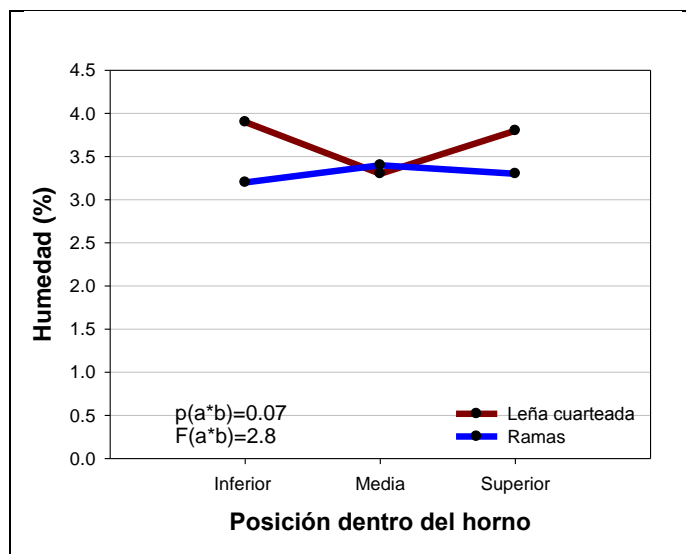


FIGURA 25. Porcentaje de humedad en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.

Cuadro 7. Análisis de la varianza del porcentaje de humedad en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$

| Fuente de variación | Cuadrado medio | Valor | |
|---------------------|----------------|----------|----------|
| | | <i>F</i> | <i>p</i> |
| Residuos | 2.27 | 6.02 | 0.020 |
| Posición | 0.24 | 0.64 | 0.53 |
| Residuos*posición | 1.06 | 2.80 | 0.07 |
| Error | 0.38 | | |

El contenido de material volátil presentó diferencias altamente significativas entre los tipos de residuos y en niveles dentro del horno (Cuadro 8). En el primer grupo estadístico se encontró el carbón de ramas en los tres niveles, los valores variaron del 23.0% al 27.9% y el menor porcentaje se obtuvo de la leña cuarteada en la parte superior con el 12.5% (Figura 26). Se considera que los valores obtenidos de material volátil son altos y reflejan una carbonización heterogénea; principalmente, en el horno con ramas, ya que a pesar de haber presentado temperaturas altas dentro del horno en algunos espacios la temperatura fue menor. Los espacios vacíos permiten la existencia de oxígeno, que propició incrementos bruscos de temperatura y la modificación del proceso de carbonización.

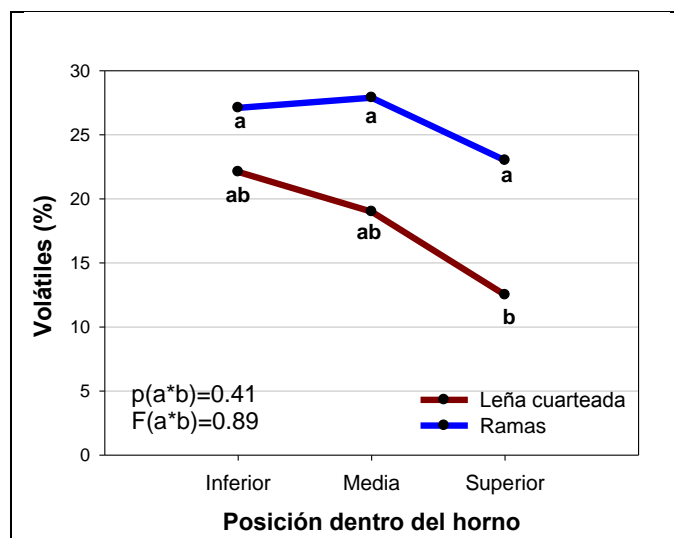


FIGURA 26. Porcentaje de volátiles en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño. Medias con diferente letra en la tendencia, son diferentes estadísticamente, $n=18$

Cuadro 8. Análisis de la varianza del porcentaje de volátiles en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$

| Fuente de variación | Cuadrado medio | Valor | |
|---------------------|----------------|----------|----------|
| | | <i>F</i> | <i>p</i> |
| Residuos | 304.18 | 16.80 | 0.0003 |
| Posición | 89.76 | 4.96 | 0.0138 |
| Residuos*posición | 16.19 | 0.89 | 0.4194 |
| Error | 18.10 | | |

De acuerdo a estos resultados, el carbón producido en los hornos tipo colmena brasileño es de buena calidad si se utilizan para su evaluación los estándares reportados por FAO (1983), ya que presenta menos del 30% de material volátil. Guayat *et al.*, (2008), obtuvieron en hornos tradicionales valores de material volátil del 6% al 22.3% y lo consideraron de buena calidad al compararlo con los porcentajes reportados por FAO (1983). Conforme aumenta el porcentaje de volátiles se incrementa la facilidad de ignición, característica de la llama, velocidad de combustión, pero disminuye la cantidad de masa y se liberan alquitranes lo que provoca la emisión de humos (Di Blas, 2008). Según Ayón (2003), los mercados asiáticos y otros mercados europeos permiten un porcentaje de volátiles máximo del 12% para uso doméstico, con este valor se mantiene en equilibrio la resistencia a la compresión, cohesión, friabilidad y fragilidad del carbón. Syred (2006), reportó en hornos colmena brasileño porcentajes de volátiles del 20% al 25%, valores que consideró como buenos o de excelente calidad. Sin embargo, el estándar de calidad para el uso doméstico en Bélgica acepta un porcentaje máximo del 12% sobre el peso seco. En Alemania la norma DIN 51749 permite como máximo 16%; en cambio, Francia no exige un porcentaje máximo de volátiles.

El contenido de cenizas no presentó diferencias significativas entre residuos, posición e interacción dentro del horno ($p>0.05$, Cuadro 9). Los valores variaron del 3.7% al 6.7% (Figura 27), los cuales son más altos que los reportados por Syred (2006), en carbón tradicional de *Quercus* spp. que presentó un valor de 2.7%. Guardado *et al.* (2010), obtuvieron valores similares en carbón de *Albizia caribea* producido en hornos metálicos a los obtenidos de residuos de *Q. sideroxylla* con porcentajes de 6.3%. Márquez *et al.*,

(2001), consideran que el contenido de cenizas y el poder calorífico son parámetros para caracterizar la calidad del carbón. Algunos autores aseguran que el contenido de cenizas afecta la manipulación y los costos globales del proceso (Ahmaruzzaman, 2009; Serrano, 2009). Según Blanco *et al*, (2007), el contenido de cenizas puede reducir la inflamabilidad al cubrir el combustible aislándolo del oxígeno, sin embargo, favorece la combustión incandescente.

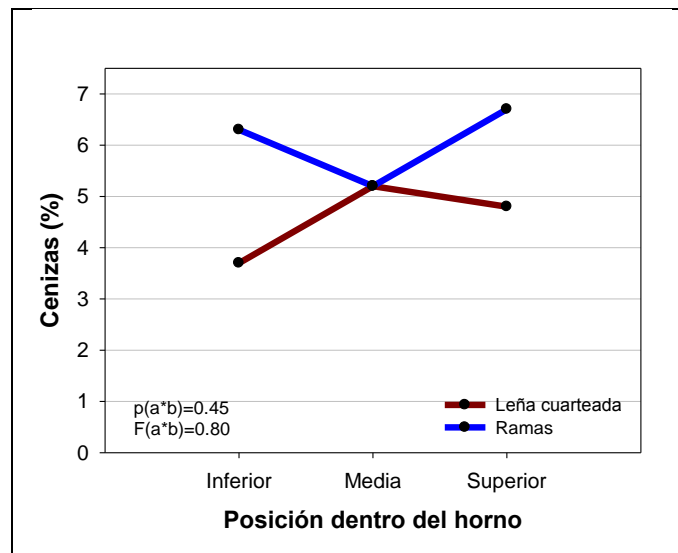


FIGURA 27. Porcentaje de cenizas en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.

Cuadro 9. Análisis de la varianza del porcentaje de cenizas en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.

| Fuente de variación | Cuadrado medio | Valor | |
|---------------------|----------------|----------|----------|
| | | <i>F</i> | <i>p</i> |
| Residuos | 39.22 | 2.89 | 0.0995 |
| Posición | 3.046 | 0.22 | 0.8003 |
| Residuos*posición | 10.84 | 0.80 | 0.4593 |
| Error | 13.57 | | |

Ahmaruzzaman (2009), indica que la ceniza es un subproducto industrial que se considera contaminante ambiental. Las normas de Bélgica y Francia no consideran el contenido de cenizas en la evaluación de la calidad del carbón. En cambio, para

Alemania el contenido máximo aceptable es del 6%. En Serbia, la norma SRPS D.B9.020 es más exigente al permitir un contenido máximo del 5%.

El porcentaje del carbón fijo presentó diferencias altamente significativas entre residuos y niveles dentro del horno (Cuadro 10). La mayor cantidad de carbón fijo se obtuvo en la parte superior del horno con leña cuarteada con el 78.8%, el cual se considera aceptable según los mercados de Bélgica, Francia y Alemania, según las Normas NBN M11-001, NF N°846 E Y DIN 51749, respectivamente. La parte media e inferior del horno con leña cuarteada presentó un carbón fijo de 72.2% y 70.1% y la menor cantidad se obtuvo del horno con ramas con el 63.2% hasta el 66.8%. El alto porcentaje de carbón fijo obtenido en la parte superior del horno con leña cuarteada se relaciona con los bajos porcentajes que obtuvo de material volátil.

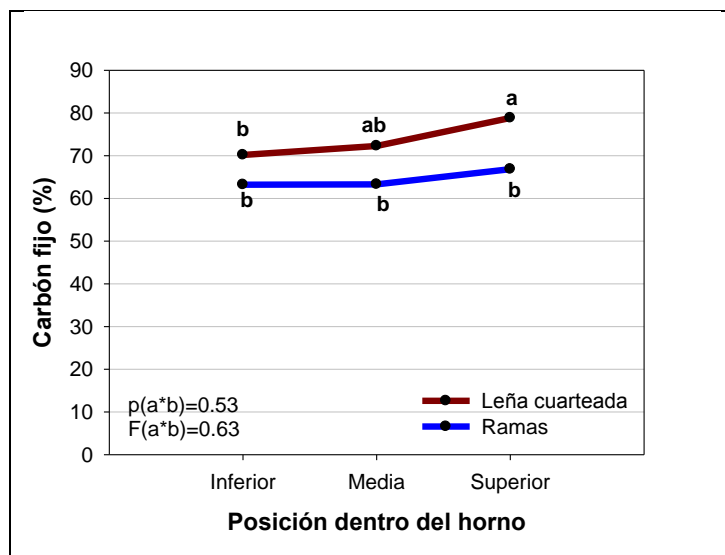


FIGURA 28. Porcentaje de carbón fijo en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño. Medias con diferente letra en la tendencia, son diferentes estadísticamente, $n=18$.

Cuadro 10. Análisis de la varianza del porcentaje de carbón fijo en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.

| Fuente de variación | Cuadrado medio | Valor | |
|---------------------|----------------|----------|----------|
| | | <i>F</i> | <i>p</i> |
| Residuos | 308.56 | 20.82 | 0.0001 |
| Posición | 53.64 | 3.62 | 0.0391 |
| Residuos*posición | 9.37 | 0.63 | 0.5385 |
| Error | 14.82 | | |

Ordaz (2003), encontró en el carbón de *Quercus crasifolia* producido en hornos tipo colmena que el mayor contenido de carbón fijo se presentó en la parte superior y media; el menor porcentaje se observó en la parte inferior del horno con 66.2%. Pacheco (2005), reportó carbón de buena calidad de *Acacia caven* Mol producido en hornos de barro al obtener un contenido de carbón fijo del 58.01%. García *et al.*, (2009), obtuvieron diferencias en el carbón fijo del carbón de *Eucalyptus saligna* Smith producido en el laboratorio con valores del 83.37% a 81.948% cuando el material provenía de diferentes alturas del árbol. La diferencia se atribuyó a la cantidad de lignina presente ya que se degrada con mayor facilidad con la altura. En Bélgica y Francia consideran que el carbón de calidad para uso doméstico debe contener del 75% al 82% de carbón fijo y en Alemania del 78% de carbón fijo, según las Normas NBN M11-001, NF N°846 E y DIN 51749, respectivamente.

En lo que respecta al poder calorífico, se detectaron diferencias altamente significativas entre residuos y niveles dentro del horno (Cuadro 11). La mayor cantidad se obtuvo de la parte media del horno con leña cuarteada con 33,900 J g⁻¹ y el menor poder calorífico se obtuvo en el horno con ramas en la parte media con 25,200 J g⁻¹.

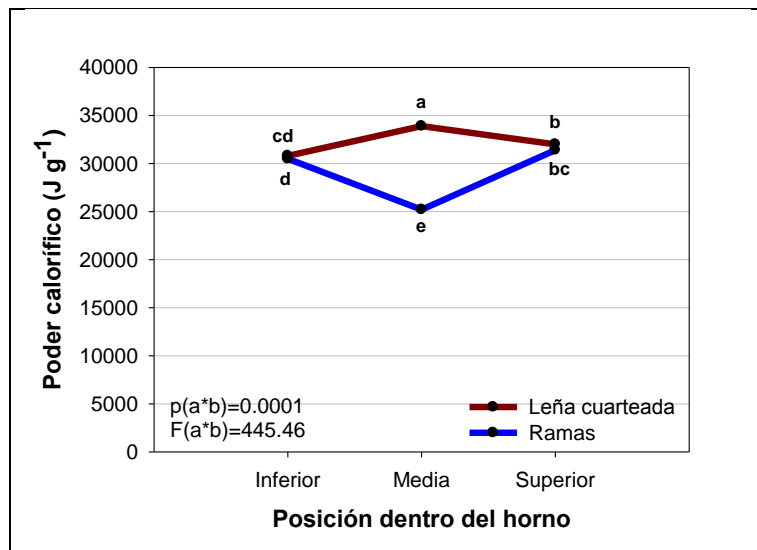


FIGURA 29. Poder calorífico obtenido en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño. Medias con diferente letra en la tendencia, son diferentes estadísticamente, $n=18$.

Cuadro 11. Análisis de la varianza del poder calorífico en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.

| Fuente de variación | Cuadrado medio | Valor | |
|---------------------|----------------|----------|----------|
| | | <i>F</i> | <i>p</i> |
| Residuos | 8615400.50 | 616.03 | 0.0001 |
| Posición | 1359838.89 | 97.23 | 0.0001 |
| Residuos*posición | 6229926.00 | 445.46 | 0.0001 |
| Error | 13985.44 | | |

Márquez *et al.*, (2001), reportó que valores altos de poder calorífico en carbón de *Pinus caribea*, *Pinus tropicalis* y *Eucaliptus saligna* producido a 700°C a nivel de laboratorio de 7,690.8 cal/g⁻¹, 7,810.3 cal/g⁻¹ y 7,690.8 cal/g⁻¹ lo que equivale a 32,200 J g⁻¹, 32700 J g⁻¹, 32,200 J g⁻¹, respectivamente, por lo cual lo consideran excelente combustible. Ordaz (2003), reportó en un estudio similar que el mayor poder calorífico se obtuvo en la parte media y superior, mientras, el menor poder calorífico en la parte inferior. Considera que valores mayores a 7000 cal/g⁻¹ que equivale a 29,300 J g⁻¹ es un carbón de buena calidad. Syred (2006), encontró en carbón de encino producido en hornos metálicos que el poder calorífico fue de 32,500 J g⁻¹. Márquez (2009), reportó en carbón mineral un poder calorífico de 32,900 J g⁻¹.

7.4 Análisis elemental

El contenido de carbono elemental presentó diferencias altamente significativas ($p<0.0001$) entre tipos de residuos y niveles dentro del horno (Cuadro 12). El mayor porcentaje de carbono se obtuvo de la parte media del horno leña cuarteada con el 89.41% y la menor cantidad se obtuvo del horno con ramas en la parte media con el 75.78%. Al comparar los valores obtenidos del carbón elemental con el carbón fijo se observó que son los valores más altos de carbono en la leña cuarteada, esto permite comprobar que presentó una carbonización más homogénea.

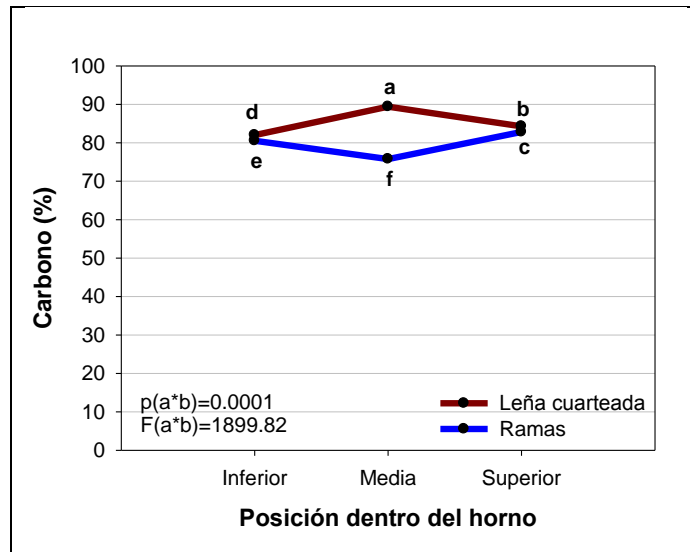


FIGURA 30. Porcentaje de carbono en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño. Medias con diferente letra en la tendencia, son diferentes estadísticamente, $n=18$.

Cuadro 12. Análisis de la varianza del porcentaje de carbono en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.

| Fuente de variación | Cuadrado medio | Valor | |
|---------------------|----------------|----------|----------|
| | | <i>F</i> | <i>p</i> |
| Residuos | 80.71 | 3482.39 | 0.0001 |
| Posición | 5.012 | 216.28 | 0.0001 |
| Residuos*posición | 44.03 | 1899.82 | 0.0001 |
| Error | 0.023 | | |

Márquez *et al.*, (2001), reportaron en *Pinus caribea*, *Pinus tropicalis* y *Eucaliptus saligna* carbonizados a nivel de laboratorio a 700°C durante 2 h que el contenido de carbono fue del 93.07%, 93.61% y 92.74%, respectivamente. El alto porcentaje se debe a que en condiciones controladas de alta temperatura y velocidad de carbonización se logra una carbonización homogénea. Demirbas (2003), encontró en el carbón que se utiliza en calderas un porcentaje del 81.5%. Demirbas (2004), reportó que el carbón producido de desechos de podas tuvo un contenido de carbono del 65% al 85%.

El porcentaje de hidrógeno presentó diferencias altamente significativas entre tipos de residuos y niveles dentro del horno (Cuadro 13). El mayor porcentaje de hidrógeno se

obtuvo del horno con ramas en la parte inferior y superior con el 3.35% y 3.32%, respectivamente. El menor porcentaje se obtuvo de las ramas en la parte media con el 2.86%. Demirbas (2003), encontró en muestras de carbón que el contenido de hidrógeno fue del 4.0%, además, asegura que las moléculas de hidrógenos y oxígeno que se liberan en forma de vapor propician con ello una serie de reacciones que resultan de la reorganización de los compuestos para formar gas de síntesis, principalmente H₂, CO y CO₂. El gas de síntesis se convierte en metanol amoniaco u otros productos.

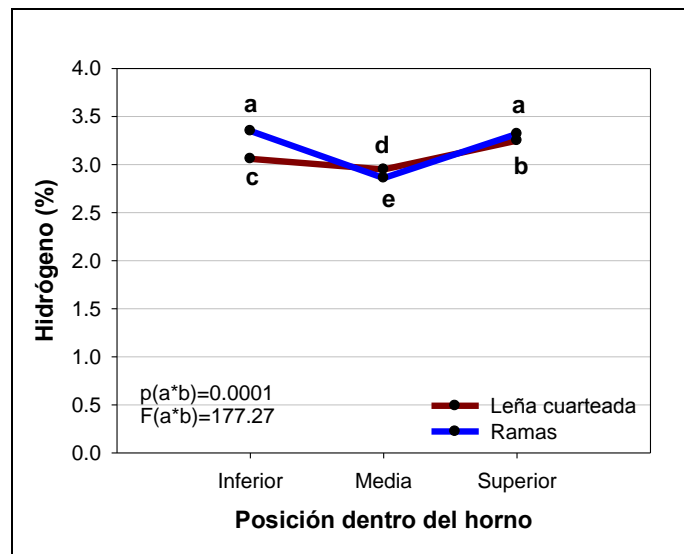


FIGURA 31. Porcentaje de hidrógeno en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño. Medias con diferente letra en la tendencia, son diferentes estadísticamente, $n=18$.

Cuadro 13. Análisis de la varianza del porcentaje de hidrógeno en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.

| Fuente de variación | Cuadrado medio | Valor | |
|---------------------|----------------|----------|----------|
| | | <i>F</i> | <i>p</i> |
| Residuos | 0.10 | 118.98 | 0.0001 |
| Posición | 0.7 | 786.02 | 0.0001 |
| Residuos*posición | 0.15 | 177.27 | 0.0001 |
| Error | 0.01 | | |

El contenido de oxígeno presentó diferencias altamente significativas entre residuos y niveles dentro del horno (Cuadro14). El mayor porcentaje de oxígeno se obtuvo de la

parte inferior del horno con ramas con el 9.12% y el menor contenido se observó en la parte media del horno con leña cuarteada con el 2.93% (Figura 32). Cuando la carbonización se realiza a 1,000°C, la reactividad disminuye, debido a que los centros activos en la superficie y el número de átomos son reducidos por reordenamiento, las dislocaciones desaparecen y los heteroátomos abandonan la estructura en gran medida por desvolatilización de compuestos de nitrógeno y oxígeno (Márquez, 2009).

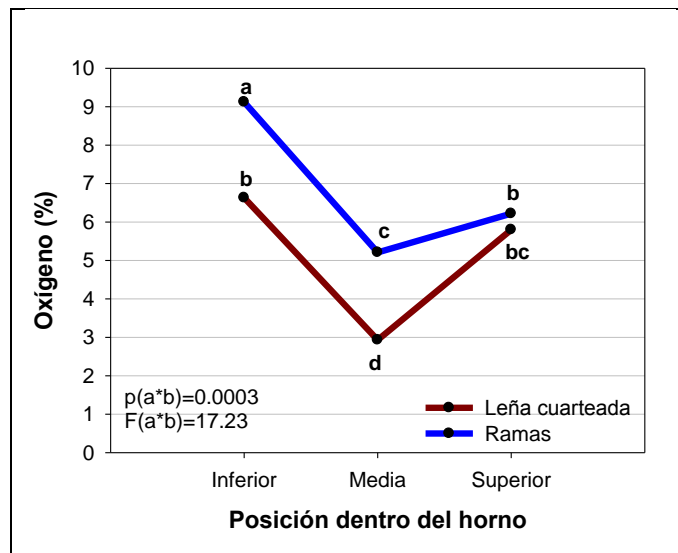


FIGURA 32. Porcentaje de oxígeno en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño. Medias con diferente letra en la tendencia, son diferentes estadísticamente, $n=18$.

Cuadro 14. Análisis de la varianza del porcentaje de oxígeno en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.

| Fuente de variación | Cuadrado medio | Valor | |
|---------------------|----------------|----------|----------|
| | | <i>F</i> | <i>p</i> |
| Residuos | 21.04 | 110.52 | 0.0001 |
| Posición | 33.82 | 177.67 | 0.0001 |
| Residuos*posición | 3.28 | 17.23 | 0.0003 |
| Error | 0.19 | | |

Al relacionar el porcentaje de oxígeno con el poder calorífico, se observó que en la parte inferior del horno con ramas se obtuvo menor poder calorífico, en cambio, el carbón de la parte media del horno con leña cuarteada presentó el mayor poder calorífico, lo

anterior coinciden con lo observado por Calventus *et al.*, (2009), ya que asegura que el oxígeno disminuye el poder calorífico del combustible. Esta misma influencia se observa en los valores reportados por Márquez *et al.*, (2001). Ésta característica del carbón vegetal lo hace superior en calidad con la biomasa sin carbonizar como la leña ya que la biomasa contiene mucho menos carbono y más oxígeno, que provoca la disminución del poder calorífico (Dermirbas, 2004).

El contenido de nitrógeno en las muestras de carbón presentó diferencias altamente significativas, entre tipos de residuos, posiciones dentro del horno e interacciones (Cuadro 15). La mayor cantidad de nitrógeno se obtuvo en el horno con ramas en la parte media con el 0.42% y el menor porcentaje lo obtuvo el carbón de leña cuarteada de la parte media con el 0.21% (Figura 33).

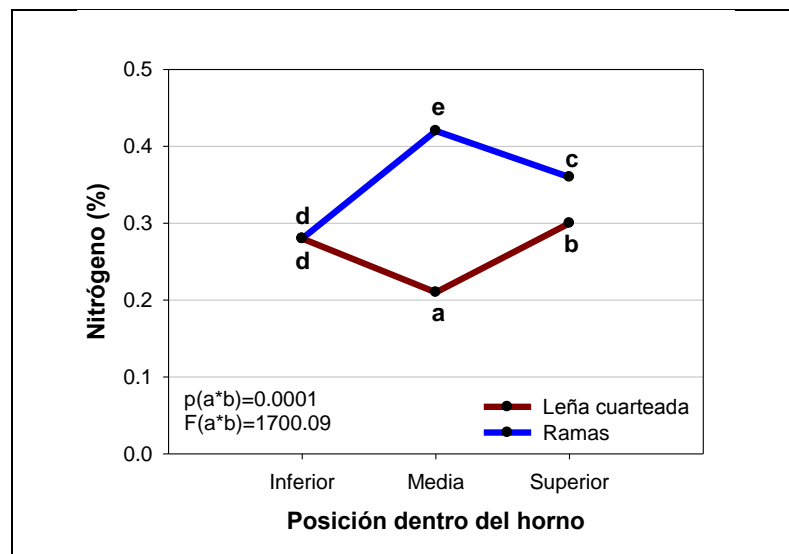


FIGURA 33. Porcentaje de nitrógeno en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño. Medias con diferente letra en la tendencia, son diferentes estadísticamente, $n=18$.

Cuadro 15. Análisis de la varianza del porcentaje de nitrógeno en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.

| Fuente de variación | Cuadrado medio | Valor | |
|---------------------|----------------|---------|--------|
| | | F | p |
| Residuos | 0.92 | 3325.84 | 0.0001 |
| Posición | 0.11 | 380.68 | 0.0001 |
| Residuos*posición | 0.47 | 1700.09 | 0.0001 |
| Error | 0.01 | | |

Algunos autores aseguran que la cantidad de nitrógeno en el carbón no produce efectos negativos al medio ambiente si se compara con los combustibles fósiles que presentan valores de 1 a 1.5% (Jenkins *et al.*, 1998; Demirbas, 2003; Robison *et al.*, 2003; Serrano, 2009). Sin embargo, al igual que la ceniza disminuye la energía disponible por unidad de masa (Jenkins *et al.*, 1998). Di Blasi (2008), indica que el carbón producido a bajas temperaturas retiene altos porcentajes de nitrógeno, en cambio, a altas temperaturas éste es liberado en forma de gas con HCN; sin embargo, tienen una ventaja significativa con el carbón mineral ya que el contenido de nitrógeno y azufre es menor.

El contenido de azufre presentó diferencias altamente significativas, entre tipos de residuos, posiciones dentro del horno e interacciones (Cuadro 16). La mayor cantidad de azufre lo obtuvo el carbón de ramas de la parte media con el 0.04% y el menor porcentaje se observó en el carbón de leña cuarteada en la parte media y superior con el 0.01%. Los valores no representan un problema ambiental ya que el contenido no es significativo a comparación de los combustibles fósiles que puede variar de 0.1% a 7.5% (Strahler 1992; Carzola, 2006).

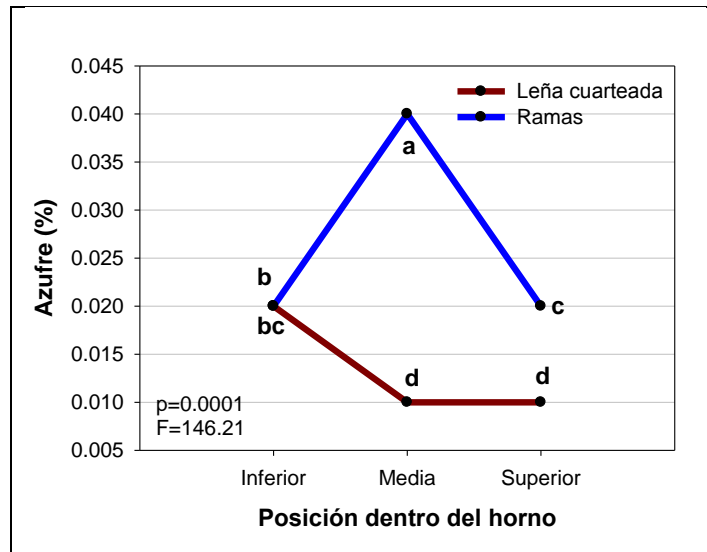


FIGURA 34. Porcentaje de azufre en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño. Medias con diferente letra en la tendencia, son diferentes estadísticamente, $n=18$.

Cuadro 16. Análisis de la varianza del porcentaje de azufre en el carbón obtenido de leña cuarteada y ramas, en tres niveles del horno colmena brasileño, $n=18$.

| Fuente de variación | Cuadrado medio | Valor | |
|---------------------|----------------|--------|--------|
| | | F | p |
| Residuos | 0.26 | 345.76 | 0.0001 |
| Posición | 0.038 | 50.66 | 0.0001 |
| Residuos*posición | 0.11 | 146.21 | 0.0001 |
| Error | 0.001 | | |

El contenido de azufre en el carbón tiene efectos negativos; ya que reduce la temperatura, limita la expulsión de gases y al oxidarse permite la formación de SO_3 que provoca problemas en calderas y finalmente se transforma en ácido sulfúrico (H_2SO_4) que es liberado a la atmósfera (Jenkins *et al.*, 1998; Robinson *et al.*, 2003).

7.5 Granulometría

Los resultados de la granulometría del carbón empaquetado indican que existen diferencias altamente significativas ($p<0.0001$) entre las clases de tipos de residuos (Cuadro 17). La mayor producción de carbón de la clase 4 (10 a 15 cm) se obtuvo de la leña cuarteada con el 51.52% (Figura 25); mientras que en los residuos de ramas, el

porcentaje de carbón de clase 4 fue de 36.06%. Para el carbón de la clase 3 (5 a 10 cm), los residuos de ramas presentaron el mayor porcentaje con 30.54% y para el carbón de leña cuarteada fue de 23.79%. La mayor cantidad de carbón de clase 2 (2 a 5 cm), se obtuvo de ramas con el 29.41% y para la leña cuarteada fue del 12.47%. El tipo de residuos que obtuvo el mayor porcentaje del carbón de clase 1 (<2 cm) fue la leña cuarteada con el 12.20%, en cambio, la rama obtuvo un 3.98%.

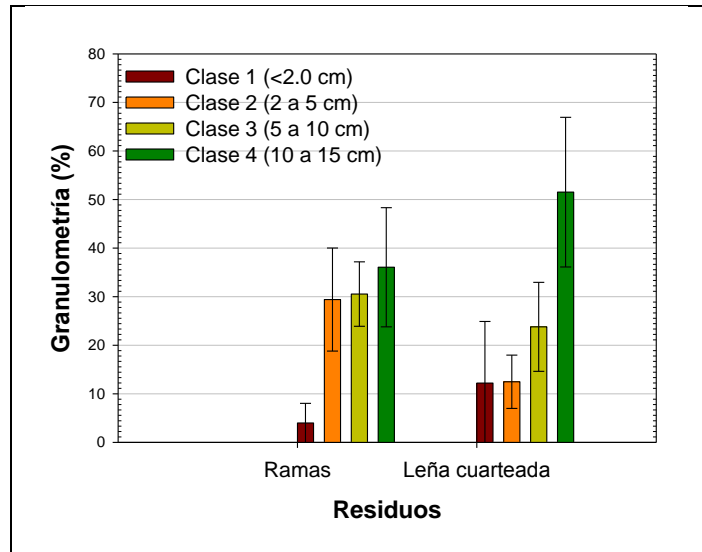


FIGURA 25. Clasificación granulométrica del carbón producido de dos residuos de aprovechamientos forestales de *Quercus sideroxylla*. Los valores ilustrados representan la media \pm desviación estándar, $n=100$.

Cuadro 17. Análisis de la varianza de la clasificación granulométrica del carbón producido de dos residuos de aprovechamientos forestales de *Quercus sideroxylla*, $n=100$.

| Variable | Grados de libertad | Cuadrado medio | Valor t | Valor p |
|----------|--------------------|----------------|-----------|-----------|
| Clase 1 | 1 | 3034.79 | 52.77 | 0.0001 |
| Clase 2 | 1 | 3414.68 | 95.67 | 0.0001 |
| Clase 3 | 1 | 1027.19 | 48.65 | 0.0001 |
| Clase 4 | 1 | 1837.08 | 20.97 | 0.0001 |

El tamaño del carbón empaquetado de los dos tipos de residuos excede el máximo permisible por la Norma DIN EN 1860-2 2005 y del mercado estadounidense, ya que establece que el 10% del carbón no debe exceder de 8 cm. Sin embargo, el carbón de las

clases 2 y 3 producido de ambos materiales se considera aceptable por ésta norma al presentar por lo menos el 80% mayor a 2 cm y no más del 7% del carbón con 1cm, sólo la leña cuarteada supera los porcentajes máximos. Para otros mercados como el de Bélgica y Francia el carbón producido en su totalidad cumple con las especificaciones necesarias, excepto la leña cuarteada con el carbón de clase 1, ya que excede el máximo aceptable.

7.6 Discusión general

La producción de carbón con hornos tipo colmena brasileño permite obtener una alto porcentaje de transformación de leña a carbón y presentan una baja tasa específica de emisiones contaminantes a comparación de los hornos tradicionales de fosa y parvas, por presentar un mayor control en la oxidación (Flores y Quinteros, 2008; Arias *et al.*, 2010), sin embargo, este sistema de producción tiene la desventaja de que se controla mediante conocimientos empíricos al observar los humos que se generan en el proceso y controlar la entrada de aire por los huidos; además, no se recuperan algunos subproductos como los gases y alquitranes generados.

Los altos rendimientos obtenidos con la leña cuarteada reflejan que los hornos tipo colmena brasileño son una alternativa sustentable de producción ya que es posible disminuir los costos de producción y desperdicios de los recursos. Contrario a lo anterior, en la carbonización con ramas se registraron las mayores temperaturas y se obtuvo menores rendimientos resultado de la forma del material, lo que propició que el control de la oxigenación fuera complicada; además, aumentó la velocidad de carbonización y la temperatura. Diversos autores aseguran que una oxidación a baja temperatura, bajas velocidades de calentamiento, presión aceptable y temperaturas finales moderadas son indispensables para lograr una carbonización aceptable (Font *et al.*, 1993; Bhat y Agarwal, 1996). Sin embargo, es necesario realizar la caracterización química de la biomasa para determinar su influencia durante el proceso de carbonización en este tipo horno.

En el carbón con ramas el porcentaje de volátiles fue alto. Según Dermirbas (2004), el alto porcentaje de volátiles facilita la ignición del carbón y como consecuencia el

aumento en el valor calórico; sin embargo, en el carbón con ramas los valores de poder calorífico fueron bajos esto se atribuye a que el contenido de oxígeno fue alto e influyó en reducir el valor calórico (Di Blasi, 2008; Rojas y Barraza, 2009). En algunas investigaciones encontraron que el carbón con alto porcentaje de material volátil y bajo contenido de carbón fijo disminuye la friabilidad y fragilidad, además aumenta su resistencia a la compresión, cohesión (Ayón, 2003; Dermirbas, 2003), esto se refleja en gran parte en la granulometría obtenida, ya que presentó un bajo porcentaje de carbón menor a un centímetro.

8. CONCLUSIONES

El proceso de producción de carbón con leña cuarteada en hornos tipo colmena brasileño se considera estable y eficiente, la carbonización fue lenta y la temperatura se incrementó lo suficiente para obtener la calidad del producto que se exige para uso doméstico e industrial. La estabilidad en el proceso con éste residuo, se debe en gran medida a la relación peso-volumen, la forma del material favoreció en reducir el espacio entre el material, por ello, se controló mejor la temperatura dentro del horno. La homogeneidad en la producción se refleja al obtener el mayor rendimiento, alto poder calorífico, contenido aceptable del porcentaje de carbono, nitrógeno, azufre e hidrógeno. La mejor calidad se obtuvo en la parte superior del horno con leña cuarteada, donde los porcentajes de carbón fijo, volátiles, cenizas y humedad se encuentran dentro de los estándares establecidos por las normas internacionales, lo que reflejan un mayor control de la oxidación. La granulometría del carbón empacado, cumple con los estándares internacionales, solo el carbón obtenido de leña cuarteada correspondiente a la clase 1 (<2 cm), la cual no cumple con lo establecido en las normas. Por otra parte, presenta un alto contenido de carbón fijo, mayor friabilidad y fragilidad. Si se quiere competir en mercados internacionales con el carbón de leña cuarteada, se debe controlar la granulometría mediante criba antes de ser empacado. El proceso de producción de carbón con ramas produce una carbonización heterogénea. La menor calidad se obtuvo en la parte media del horno al obtener los valores más bajos de carbón fijo, poder calorífico, carbono elemental; además de presentar el mayor porcentaje de hidrógeno, nitrógeno y azufre. Es necesario controlar el proceso de carbonización desde el inicio ya que las características del material favorecen un incremento rápido de la temperatura que provoca mayor consumo del material y por consecuencia se propicia un bajo rendimiento y baja calidad fisicoquímica del carbón obtenido.

9. RESUMEN

La actual crisis energética ocasionada por la reducción de las reservas de combustibles fósiles y el deterioro ambiental producido principalmente por el uso desmedido de estas fuentes, ha promovido el uso de otras fuentes de energía consideradas como limpias. El uso de la biomasa se ha incrementado significativamente a nivel mundial, por ser una fuente de energía renovable, permite contribuir en la disminución de los efectos adversos ocasionados por la utilización de combustibles fósiles cuando los sustituye en los procesos industriales. En México, el uso de la biomasa con fines energéticos se realiza con bajos rendimientos y altos costos de producción. Por lo anterior y en la búsqueda de mejorar la eficiencia en la producción de carbón, en el presente estudio se determinó la calidad, rendimientos y eficiencia energética en la producción del carbón vegetal producido a partir de residuos de ramas y leña cuarteada de *Quercus sideroxylla* Humb. & Bonpl., en hornos tipo colmena brasileño en el estado de Durango. El proceso se evaluó al relacionar la temperatura del horno con el tiempo de carbonización, se determinó el rendimiento, el poder calorífico y la calidad del carbón. La calidad se determinó mediante análisis inmediato y elemental. La calidad granulométrica el carbón se clasificó de acuerdo a su tamaño. Debido a que los valores obtenidos para las variables de los análisis inmediato y elemental se expresaron en porcentajes, los datos se transformaron con la función de la raíz cuadrada de arcoseno de cada variable. Posteriormente, se analizaron mediante el diseño experimental con un criterio de clasificación con arreglo factorial y se realizó la comparación múltiple de medias de Tukey. Los resultados indicaron que al relacionar la temperatura con el tiempo de carbonización en el proceso de la leña cuarteada y ramas fue de $r^2=0.9955$ y $r^2= 0.9854$ respectivamente, con una probabilidad de $p=0.0001$. El proceso con leña cuarteada fue más lento al requerir 131.6 h, la temperatura dentro del horno fue de 975°C y obtuvo el mayor rendimiento con $5.4 \text{ m}^3 \text{ Tm}^{-1}$. La mejor calidad se obtuvo en la parte media del horno con leña cuarteada al obtener el mayor poder calorífico con $32000 \text{ (J g}^{-1}\text{)}$, humedad 3.3%, volátiles 19.0%, cenizas 5.2%, carbón fijo 72.2% y carbono 89.41%. En el análisis elemental se obtuvo bajo contenido de H 2.95%, O 2.93%, N 0.2% y S 0.01%. La granulometría obtenida cumple con los estándares de calidad de los mercados de Francia y Bélgica. El residuo de leña cuarteada facilita el proceso de carbonización debido a sus características. Para producir carbón de mayor calidad a partir de ramas es necesario controlar las entradas de aire para evitar el incremento de la temperatura.

10. ABSTRACT

The energy crisis caused by the reduction of fossil fuel reserves and the environmental deterioration due to the excessive use of those sources, has promoted the use of new clean energy sources. The use of biomass has been increased at world-wide level, this because is a renewable energy source which contributes to decrease negatives effects caused by fossil fuels if they were to be replaced in industrial processes. The use of biomass as an energy source is carried out in México with low yields and it has high production costs. In order to improve the efficiency for charcoal production precess, the present study determined the quality, yields and energy efficiency for charcoal production from branches and cracked firewood residues of *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl., in Brazilian beehive ovens in the state of Durango. The industrial production process was evaluated regarding the following factors: oven temperature vs. time, charcoal yields, quality and calorific values. Charcoal quality was determined using proximate and analysis of elements. Charcoal was classified according to its size and due to the fact that variables data obtained for immediate and elements analysis were expressed as percentages, they were transformed using a function of arcsine square root for each variable. The data were analyzed using a factorial arrangement and multiple comparisons of Tukey means. The relationship between temperature and time process for cracked firewood and branches were $r^2 = 0.99$ and $r^2 = 0.98$ respectively ($p = 0.0001$). The carbonization process for cracked firewood was slower than that from branches residues, and it required 131.6 h, the temperature in the oven reached 975°C and showed the best yields with $5.4 \text{ m}^3 \text{ Tm}^{-1}$. The best charcoal quality was obtained from the middle of the oven when using cracked firewood; the calorific value was 32000 J g⁻¹, 3.3% of moisture content, 19.0% of volatiles, 5.2% ash, 72.2% of fixed carbon and 89.41% carbon. Analysis of elements showed the values of H 2.95%, O 2.93%, N 0.2% and S 0.01%. Charcoal quality regarding the size obtained is in accordance to that from France and Belgium standards. Charcoal quality produced from branches can be increased by controlling air intakes in order to prevent an increase in temperature.

11. LITERATURA CITADA

Ahmaruzzaman, M. 2009. A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*. 13(3):327-363.

Antal, M., J. y Gronli, M. 2003. *The Art, Science and Technology of Charcoal Production*. American Chemical Society. Published on web 03/14/2003 Hawaii Natural Energy. Institute of the University of Hawaii. 22 p.

Aragón, C., M. E. 2009. La pirólisis, solución a los entresaqueos de las plantaciones. *In*: <http://www.agrovetindustrial.com/docs/Articulo%20Carbon%20Vegetal.pdf>. Consultado Octubre 2011.

Argueta, S., C. 2006. Descripción y análisis de dos métodos de producción vegetal en el estado de Tamaulipas. Tesis licenciatura Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 57 p.

Arias, T., Miranda, K. & Bacalini, P. 2006. Diagnóstico del mercado de carbón vegetal en el noreste de México. Querétaro, México, CONAFOR-NYDE AC. Informe Técnico. 93 pp.

Arias, T.; Riegelhaupt, E.; Martínez, B., R.; Masera, C., O. 2010. Wood fuel development and climate change mitigation in Mexico. *In*: *Forests and Climate Change Working Paper*. 70 p.

Ayón, A., M. S. 2003. Los procesos de carbonización ascendente y descendente en el horno metálico CEVAG. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, Durango. pp: 14- 19.

Baettig, P., R. M. 2001. Lumber modulus of elasticity estimation using transverse vibration technique. *Madera Ciencia y tecnología*. 3(1-2): 44-51.

Baldock, J., A y Smernik, R., J. 2007. Chemical composition and bioavailability of thermally altered *Pinus resinosa* (Red pine) wood. *Organic Geochemistry* 3(9): 14-19.

Baños, R.; Manzano, A., F.; Montoya, F. G.; Gil, C.; Alcayde, A.; Gómez, J. 2011. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. *Renewable and sustainable reviews*. 15(4): 1753-1766.

Bhat, S. and Agarwal, P., K. 1996. The effect of moisture condensation on the spontaneous combustibility of coal, *Fuel*, 75(13): 1523-1532.

Blanco, J.; García, D.; Castellnou, M.; Molina, D.; Grillo, F. 2007. Curso básico de incendios forestales. Universidad de Lleida. España. 89 p.

Calventus, Y., A.; Carreras, R., J.; Casals, M.; Colomer, P.; Costa, M.; Jaén, A.; Monserrat, S.; Olivia A.; Quera M.; Roca X. 2009. Tecnología energética y medio ambiente – I. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL. Barcelona. 190 p.

Camps, M., M y Martín, F., M. 2008. Los Biocombustibles. 2da Edición. Mundi-Prensa. Madrid, España. 361 p.

Carzola, C., J. A. 2006. Investigación metalúrgica del carbón mineral para briquetas de uso doméstico. Tesis licenciatura. Escuela superior técnica del litoral. Facultad de Ingeniería de Ciencias de la Tierra. Guayaquil, Ecuador. 146 p.

Challice, J., S. y Clarke, G., M. 1965. Mathematical analysis of the Gaussian and Lorentzian Incremental second derivate functions, *Spectrochimica Acta*. (21): 791-797.

Compeán, G., F. J. 1994. La madera aserrada y otros productos forestales ante el TLC. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico de Durango. Durango, Dgo. 123 p.

Compeán, G., F. J. y Quiñones C., A. 2003. Diseño de los hornos de carbonización más comunes en México. Folleto Científico No 19. Campo Experimental Valle del Guadiana. INIFAP – SAGAR. Durango, México. 19 p.

Conesa, F., J. A. and Domene, A. 2011. Biomasses pyrolysis and combustion kinetics through n-th order parallel reactions. *Thermochimica Acta*. Article in Press, Corrected Proof (2011). ISSN 0040-6031.

Deeming, J. and Brown, E. 1975. Fuel model in the national fire danger rating system. *Jorn. For.* 73: 347-350.

Demirbas, A. 2003. Sustainable cofiring of biomass with coal. *Energy Conversion and Management*. 44(9): 1465-1479.

Demirbas, A. 2004. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in energy and combustion science*. 31(2): 171-192.

Di Blasi., C. 2008. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*. 34 (1): 47–90

DIN 51749 1989. Testing of solid fuels- Grill charcoal and grill charcoal briquettes: Requirements and test methods

Enciso, E., E. 2007. Guía para el uso y aprovechamiento de la biomasa en el sector forestal. España. 40 p.

FAO. 1983, Métodos simples para producir carbón vegetal. FAO MONTES/41. Roma. - 154 p.

FAO. 2003. Past trends and future prospects for the utilisation of wood for energy, por J. Broadhead, J. Bahdon y A. Whiteman. Global Forest Products Outlook Study Working Paper GFPOS/WP/05. Roma. pp. 24-36

FAOSTAT. 2009. Highlights on wood charcoal: 2004-2009. In: http://faostat.fao.org/Portals/_Faostat/documents/pdf/Wood%20charcoal.pdf. Octubre 2011.

Ferreira, Q., W. 2009. Utilización energética de residuos vegetales. In: http://www.bepinet.net/pdfs/eventos/Produccion%20y%20Aprovechamiento%20Energetico%20de%20Biomasa/memorias/utilizacion%20energetica%20residuos%20vegetales_WFQ.pdf. Consultado Octubre 2011.

Flores, F., R. E. y Quinteros, S. 2008. Diseño de horno tipo retorta para elaborar carbón vegetal. Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Tesis de Ingeniería. Antigua Cuscatlán, El Salvador, C.A.

Flotats, X. 2008. Producción de biogás y gestión de purines. Jornadas: Biocombustibles. Crisis energética oportunidades de negocio. 26-27 noviembre. Guadajira (Badajoz).

Font, R., Marcilla, A., Devesa, J. and Verdú, E. 1993. Kinetics study of the flash pyrolysis of almonds shells in fluidized bed reactor at high temperatures. Journal of Analytic and applied pyrolysis. P 245-246.

García, R., L.; Márquez, M., M.; Aguiar, T., F.; Arauso P., L.; Carballo, A., L.; Orea, I., U.; Zanzi, R. 2009. Rendimiento de los productos de la descomposición térmica de la madera de *Eucalyptus saligna* Smith a diferentes alturas del fuste comercial. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente. Universidad Autónoma Chapingo, México. 15(2): 147-154.

García, M., J. G. 2010. Determinación de rendimientos y calidad de carbón de residuos de *Quercus* spp, grupo Erythrobalanus, en dos tipos de hornos. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, Dgo. p. 91.

Goldstein, S., I. 1979. Productos químicos derivados de la madera. Unyslava No. 125. Productos químicos de la madera. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. Vol. 31. Roma, Italia. p. 34.

Guardado, G., M. B.; Rodríguez, R., J. A.; Monge, H., L. E. 2010. Evaluación de la calidad del carbón vegetal producido en hornos de retorta y hornos metálicos portátiles en el Salvador. Tesis Ingeniero mecánico. Antiguo Cuscatlán, El Salvador. 67 p.

Guayat, D., M. A.; Velázquez, V., D.; Vidal, C., A.; Rodríguez, R., J.; Manzanares, A., K.; Hernández, M., F. Capote, P., V. 2008. Evaluación del carbón vegetal obtenido a partir de residuos maderables de pino. Revista Forestal Caracoa 27(2). 20 p.

Gutiérrez, V., E. G. y Villalón, M., H. 2001. El papel del producto en los sistemas agroforestales. In: Cuaderno de divulgación No. 4. Temas selectos de agroforestería III. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares Nuevo León, México. p. 72.

Jenkins, B., M.; Baxter, L., L.; Miles, Jr.; Miles, T., R. 1998. Combustion properties of biomass. Fuel Processing Technology. 54(1-3): 14-46

Nakata, T.; Silva, D.; Rodionov, M. 2011. Application of energy system models for designing a low-carbon society. Progress in Energy and Combustion Science. 37 (4): 462-502

NBN M11-001: Charcoal and charcoal briquettes for domestic use: Designation – Specification- Tests

Neves, D.; Thunman, H.; Matos, A.; Tarelho, L. Gomez, B. A. 2011. Caracterizacion and prediction of biomass pyrolysis products. *Progress in Energy and Combustion Science*. 37(5): 611-630.

Márquez, M., F.; Cordero, A., T.; Rodríguez, J., M.; Rodríguez, J., J. 2001. Estudio del potencial energético de biomasa de *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* y *Pinus tropicalis* Morelet (PT); *Eucalyptus saligna* Smith (Es) y *Eucalyptus citriodora* Hook(Ec) y *Eucalyptus pellita* F. Muell (Ep); de la provincia del Pinar del Rio. *Revista Chapingo, serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 7(1): 83-89.

Márquez, M., F. 2009. Aprovechamiento energético de la biomasa forestal: una alternativa sostenible. Universidad del Pinar del Rio. 52 p.

Martín, M., F. 1989. El carbón vegetal propiedades y obtención agroguías Mundi-prensa. Madrid, España. pp. 13-21.

Martínez, L., S. 2009. Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña. Tesis doctoral. Universitat Girona. 234 p.

Moura, P., E.; Regobello, R.; Munaiar, N.; J.; Calil, J., C. 2007. Estudio teorico-experimental sobre la degradación térmica de vigas de *Eucalyptus*. *Madera, ciencia y tecnología*. 9(2):135-144.

Omer, A., M. 2007. Energyb, environment and sustainable development. *Renewable and susteineble energy*. 12 (9): 2265-2300.

Ordaz, H., J. C. 2003. Análisis de la calidad del carbón vegetal de encino producido en horno tipo colmena brasileño en Huayacocotla, Veracruz. Tesis licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. 74 p.

Pacheco, M. 2005. Evaluación del proceso de carbonización y calidad del carbón de *Acacia caven* (Mol.), producido en hornos de barro. Memoria profesional Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales Universidad de Chile. Santiago de Chile. 50 p.

Pascal, J. 2005. Sistema de supra carbonización MAGUE. Francia. Archivo electrónico proporcionado por Industrias MAGUE.

Patiño, D., J. F. y Smith, Q., R. 2008. Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistemático. In: Revista energética. No. 39. Universidad Nacional de Colombia. Medellín Colombia. pp. 19-36.

Petrović, S. y Glavonjić, G. 2011. Standards and certificates for charcoal and charcoal briquettes in the function of harmonization of their quality and market development. Faculty of Forestry University of Belgrade.

Picardo, N., A.; Broto, C., M.; Marinas, B., M. E. 2008. Propuesta de clasificación nacional de productos forestales por actividades –CNPF. Cesefor. 463 p.

PNUMA, 2010. Anuario, avances y programas científicos en nuestro cambiante medio ambiente 2010. Programa de las naciones unidas para el medio ambiente. Kenia. pp. 58.

Rentería, A., J. B.; Treviño, G., E. J.; Navar, J., J. J.; Aguirre, C., O. A.; Cantú, R., I. 2005. Caracterización de combustibles leñosos en el ejido Pueblo Nuevo, Durango. Revista Chapingo, Serie Forestal y del Ambiente. 11(1): 51-56

Richardson, J., Björheden, R., Hakkila, P., Lowe, A.T. and Smith, C.T. (eds.). 2002. Bioenergy from Sustainable Forestry: Guiding Principles and Practice. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 344 pp.

Robinson, L., A.; Rhodes, S., J.; Keith, W., D. 2003. Assessment of potential carbon dioxide reductions due to biomass-coal cofiring in the United States. *Environmental Science & Technology*. 37(22): 5081-5089.

Romo, O., N.; Toro, A., F.; Flores, P., L. M.; Cañas, V., A. 2011. Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y térmicas de tallos de café y su análisis económico para la producción de pellets como biocombustible sólido. *Revista VIRTUALPRO procesos industriales*. No. 11

Romahn, De La Vega., C. F. 1992. Principales productos forestales No maderables de México. Libro. Universidad Autónoma Chapingo. Edo de México. Pp: 123-161.

Rojas, G., A. F. y Barraza, B., J. M. 2009. Características termogravimétricas de carbonizados obtenidos a altas velocidades de calentamiento. *Revista Ingeniería e Investigación*. 29(2): 25-34.

Rothermel, R., C. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wild land fuels. USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station Research Paper INT-115. 40 pp.

Rowell, R. M. 1991. Chemical Modification of Wood. In: *Wood and cellulosic chemistry*. New York, cap.15 p. 703-756. David Hon & Nobuo Shiraishi editores.

Sanabria, E., O.; Cairé, M. E.; Frank, W., A. 2007. Optimización de producción de carbón con *Aspidosperma quebracho blanco* en la provincia del Charco Blanco, Argentina. *Revista Chapingo, serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 13(1) 23-27.

Sanz, F. y Piñeiro, G. 2003. Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena monte-industria. *Revista CIS-MADERA*. www.cismadera.org.

Scheffler, W., C. 1981. Bioestadística. Fondo Educativo Interamericano. México, Distrito Federal. 539. P

Şensöz, S. 2003. Slow pirólisis of wood barks from *Ponus brutia*. Bioresource technology. 89(3): 307-311.

SEMARNAT, 2007. Anuario Estadístico de la Producción Forestal.

Serrano, A., L. O. 2009. Producción de carbón vegetal mediante carboneras en zonas rurales empobrecidas. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Madrid, España. 153 p.

Sígala, R., J. A. 2009. Calidad de planta en diez viveros forestales del Estado de Durango. Tesis licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco Edo. México. Pp: 26-28.

Sprenger, G.E. 1995. Curso de producción de carbón vegetal en la planta de Noram de México S.A. de C.V. Durango. Documento privado de la empresa. 42 p.

Stassen, E., H. 2002. Nuevas tecnologías de producción de carbón vegetal. Unasylva 211. Madera de energía. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. Vol. 53. Roma, Italia. p. 34.

Steel, R.G.D., and J.H. Torrie. 1980. Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach (2nd Ed.). McGraw-Hill Inc., New York.

Strahler, A. 1992. Geología Física. Omega Ediciones. Barcelona. 629 p.

Syred, N. 2006. A review of oscillation mechanisms and the role of the precessing vortex core (PVC) in swirl combustion systems. Progress in energy and combustion science 32(2): 93-161

Thrän, D. 2002. Terminología, información, estadística y normas sobre dendroenergía. *Unasylva* 211. Madera de energía. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. Vol. 53. Roma, Italia. p. 34.

Trossero, M. A. 2002. Madera para energía: el camino a seguir. *Unasylva* 211. Madera de energía. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. Vol. 53. Roma, Italia. p. 34.

Velasco, S., F. J.; Acuña P., J. J.; Urham R., M.; Moreno R., F. 2008. Estudios de la co-combustión de lodos de la pta cañaveralejo de la ciudad de cali con carbones consumidos en el Valle del Cauca, Colombia, utilizando diseño experimental al azar. *EIDENAR*. 7

Velázquez, M., B. 2006. Situación de los sistemas de aprovechamientos de los residuos forestales para su utilización energética. *Ecosistemas*. 15(1): 77-86.

Villalón, M., H. y Carrillo P., A. 2010. Plantas productoras de leña y carbón. In: De la lechuguilla a las biopelículas vegetales las plantas útiles de Nuevo León. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, Nuevo León, México. p. 267- 280.

Whiteman, A., J.; Bradhead J.; Bahdon. 2002. Revisión de las estimaciones de FAOSTAT relativas al combustible de madera. *Unasylva* 211. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales. Vol. 53. Roma, Italia. p. 34

Wu, M., R.; Schott, D.L.; Lodewijks, G. 2011. Physical properties of solid biomass. *Biomasa and Bioenergy*. 35(5): 2093-2105

Yang, H.; Yan R.; Hanping C.; Dong H., L.; Chuguang Z. 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel* (86) 12-13: 1780-1788.