

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONOMICAS

RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL CARBÓN VEGETAL PRODUCIDO A PARTIR DE  
CUATRO ESPECIES FORESTALES DE RAPIDO CRECIMIENTO (*Eucalyptus saligna*

Sm., *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Mill., *Gmelina arborea* Roxb. y *Casuarina*  
*cunninghamiana* Miq) Y ENCINO (*Quercus pedunculata* Née).

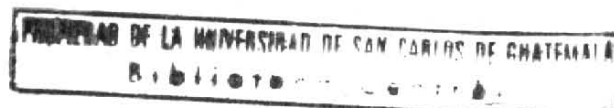
PRESENTADA A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE  
AGRONOMIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



OSCAR AUGUSTO HERNÁNDEZ CAMPOS

En el acto de investidura como  
INGENIERO AGRONOMO EN SISTEMAS DE PRODUCCION AGRICOLA  
EN EL GRADO ACADEMICO DE LICENCIADO

Guatemala, marzo de 1,998



A  
01  
T(1725)

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

**RECTOR**

**Dr. JAFETH ERNESTO CABRERA FRANCO**

**JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMIA**

- |                      |   |
|----------------------|---|
| <b>DECANO</b>        | <b>Ing. Agr. José Rolando Lara Alecio</b>             |
| <b>VOCAL PRIMERO</b> | <b>Ing. Agr. Juan José Castillo Mont</b>              |
| <b>VOCAL SEGUNDO</b> | <b>Ing. Agr. William Roberto Escobar López</b>        |
| <b>VOCAL TERCERO</b> | <b>Ing. Agr. Alejandro Arnoldo Hernández Figueroa</b> |
| <b>VOCAL CUARTO</b>  | <b>Br. Estuardo Enrique Lira Prera</b>                |
| <b>VOCAL QUINTO</b>  | <b>P. Agr. Edgar Danilo Juárez Quim</b>               |
| <b>SECRETARIO</b>    | <b>Ing. Agr. Guillermo Edilberto Méndez Boteta</b>    |

Guatemala, marzo de 1,998

Honorable Junta Directiva  
Honorable Tribunal Examinador  
Facultad de Agronomía  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Distinguidos miembros:

De la manera más cordial y de acuerdo con las normas establecidas por la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a consideración de ustedes el trabajo de tesis titulado:

**RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL CARBÓN VEGETAL PRODUCIDO A PARTIR DE CUATRO ESPECIES FORESTALES DE RAPIDO CRECIMIENTO (Eucalyptus saligna Sm., Eucalyptus grandis W. Hill ex Maid, Gmelina arborea Roxb. y Casuarina cunninghamiana Miq.) Y ENCINO (Quercus pedunculata Née).**

Presentada como requisito previo a optar al Título de Ingeniero Agrónomo en Sistemas de Producción Agrícola, en el Grado Académico de Licenciado.

En espera de su aprobación, quedo de ustedes deferentemente,



Oscar Augusto Hernández Campos

## **ACTO QUE DEDICO**

**A: DIOS**

**MIS PADRES**

**Oscar Enrique Hernández Salguero  
Irma Esther Campos de Hernández**

**MI ESPOSA**

**Alma Lucrecia Alvarado de Hernández**

**A MIS HIJAS**

**Alma Lucía y Andrea Fernanda Hernández Alvarado**

**MIS HERMANAS**

**Irma Susana, María Gabriela y Ana Lucrecia**

**MIS ABUELOS, DE FORMA MUY ESPECIAL**

**Leonardo Campos Girón**

**MI FAMILIA EN GENERAL**

**A TODOS LOS AMIGOS QUE A LO LARGO DE MI VIDA ESTUDIANTIL FORJE**

**TESIS QUE DEDICO**

**A:**

**GUATEMALA**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

**FACULTAD DE AGRONOMIA**

**DEPARTAMENTO DE BECAS DE BIENESTAR ESTUDIANTIL, USAC**

**COLEGIO MARIANO Y RAFAEL CASTILLO CORDOVA**

**MIS COMPAÑEROS, AMIGOS Y ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE  
AGRONOMIA**

## AGRADECIMIENTOS

**A:**

Mi asesor Ing. Agr. Walter García Tello por sus oportunas orientaciones en la realización de esta investigación, las cuales hicieron posible su culminación.

Ing. Agr. Gustavo Hernández Arreaga por su apoyo en el análisis e interpretación estadística de los resultados de la presente investigación.

Personal del laboratorio del Ministerio de Energía y Minas en especial a los Ingenieros Mayra Villatoro, Julio Villacinda y Zaqueo Par por su apoyo en los análisis de laboratorio.

Departamento de Planificación y Desarrollo Energético del Ministerio de Energía y Minas, en especial a los Ingenieros Sergio Quemé, Horacio Linares y Oscar Alvarado por su apoyo en el desarrollo de la presente investigación.

Todas la personas que de una u otra manera ayudaron en la realización de la presente investigación.

## CONTENIDO GENERAL

Título.	Página
INDICE DE CUADROS .....	iv
INDICE DE FIGURAS .....	iv
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	3
3. MARCO TEÓRICO .....	4
3.1. Marco Conceptual .....	4
3.1.1. Historia del Carbón Vegetal .....	4
3.1.2. Madera como Fuente de Energía .....	5
3.1.3. Composición de la Madera .....	6
3.1.4. Carbonización de la Madera y de sus Componentes .....	7
3.1.5. Características y Propiedades del Carbón Vegetal .....	13
3.1.6. Calidad del Carbón Vegetal .....	18
3.1.7. Rendimiento del carbón vegetal .....	20
3.1.8. Hornos Usados en la Fabricación de Carbón Vegetal .....	22
3.1.9. Usos del Carbón Vegetal .....	25
3.1.10. Descripción de las especies en estudio .....	28
3.2. Marco Referencial .....	39
3.2.1. Ubicación Geográfica .....	39
3.2.2. Zona de vida .....	39
3.2.3. Clima .....	40
4. OBJETIVOS .....	41
4.1. GENERAL .....	41

4.2. ESPECÍFICOS .....	41
5. HIPÓTESIS .....	42
6. METODOLOGÍA .....	43
6.1. Descripción del área experimental .....	43
6.2. Tratamientos y repeticiones .....	43
6.2.1. Tratamientos .....	43
6.2.2. Número de repeticiones .....	44
6.3. Diseño experimental .....	44
6.4. Variables a medir .....	44
6.5. Tipo de horno .....	45
6.6. Recolección y preparación de las muestras .....	46
6.6.1. Tamaño de las muestras .....	46
6.6.2. Preparación de las muestras .....	46
6.7. Carbonización de las muestras .....	47
6.7.1. Manejo y traslado del producto de las carbonizaciones .....	47
6.8. Análisis de laboratorio .....	48
6.9. Ordenamiento de la información .....	48
6.10. Procesamiento de datos .....	48
6.11. Análisis estadístico .....	48
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	52
7.1. Rendimiento .....	53
7.2. Calidad .....	53
7.2.1. Contenido de Humedad .....	54
7.2.2. Contenido de Cenizas .....	55
7.2.3. Contenido de Materias Volátiles .....	56



7.2.4. Contenido de Carbono Fijo .....	57
7.2.5 Poder Calorífico .....	58
7.3 Análisis estadístico .....	59
8. CONCLUSIONES .....	61
9. RECOMENDACIONES .....	62
10. BIBLIOGRAFÍA .....	63
11. APENDICE .....	65

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Composición Química y Proporción de los componentes Principales de la Madera en Valores Promedio .....	6
Cuadro 2.	Resumen de los resultado de Rendimiento y Calidad del Carbón Vegetal de las especies evaluadas ( <u>Eucalyptus saligna</u> Sm., <u>Eucalyptus grandis</u> W. Hill ex Maid, <u>Gmelina arborea</u> Roxb., <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. y <u>Quercus peduncularis</u> Née) .....	52

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Distribución de los Recipientes que Contienen las Muestras Dentro de la Carbonera .....	47
Figura 2.	Rendimiento promedio de las especies evaluadas ( <u>Eucalyptus saligna</u> Sm., <u>Eucalyptus grandis</u> W. Hill ex Maid, <u>Gmelina arborea</u> Roxb., <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. y <u>Quercus peduncularis</u> Née) expresado en porcentaje .....	54
Figura 3.	Contenido de Humedad promedio de las especies evaluadas ( <u>Eucalyptus saligna</u> Sm., <u>Eucalyptus grandis</u> W. Hill ex Maid, <u>Gmelina arborea</u> Roxb., <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. y <u>Quercus peduncularis</u> Née) expresado en porcentaje .....	55
Figura 4.	Contenido de Cenizas promedio de las especies evaluadas ( <u>Eucalyptus saligna</u> Sm., <u>Eucalyptus grandis</u> W. Hill ex Maid, <u>Gmelina arborea</u> Roxb., <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. y <u>Quercus peduncularis</u> Née) expresado en porcentaje .....	56
Figura 5.	Contenido de Materias Volátiles promedio de las especies evaluadas ( <u>Eucalyptus saligna</u> Sm., <u>Eucalyptus grandis</u> W. Hill ex Maid, <u>Gmelina arborea</u> Roxb., <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. y <u>Quercus peduncularis</u> Née) expresado en porcentaje .....	57
Figura 6.	Contenido de Carbono Fijo promedio de las especies evaluadas ( <u>Eucalyptus saligna</u> Sm., <u>Eucalyptus grandis</u> W. Hill ex Maid, <u>Gmelina arborea</u> Roxb., <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. y <u>Quercus peduncularis</u> Née) expresado en porcentaje .....	58
Figura 7.	Poder Calorífico promedio de las especies evaluadas ( <u>Eucalyptus saligna</u> Sm., <u>Eucalyptus grandis</u> W. Hill ex Maid, <u>Gmelina arborea</u> Roxb., <u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq. y <u>Quercus peduncularis</u> Née). .....	59

**RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL CARBÓN VEGETAL PRODUCIDO A PARTIR DE CUATRO ESPECIES FORESTALES DE RAPIDO CRECIMIENTO (Eucalyptus saligna Sm., Eucalyptus grandis W. Hill ex Maid, Gmelina arborea Roxb. y Casuarina cunninghamiana Miq. ) Y ENCINO (Quercus peduncularis Née).**

**YIELED AND CUALITY OF THE VEGETAL CHARCOAL PRODUCED OF FOUR FOREST SPECIES OF FAST GROWTH AND ENCINO**

**RESUMEN**

En la investigación se estudiaron básicamente las características que permiten evaluar y comparar el rendimiento y la calidad del carbón vegetal producido a partir de las cinco especies forestales evaluadas.

Las variables medidas fueron, el rendimiento en base seca, y las variables que determinan la calidad del carbón las cuales son el contenido de humedad, contenido de materias volátiles, contenido de cenizas, contenido de carbono fijo y poder calorífico.

La investigación se realizó en el parque tecnológico "EL FARO", con el apoyo del Ministerio de Energía y Minas. Para llevar a cabo la investigación se corrieron cinco repeticiones para cada especie, las cuales fueron posteriormente analizadas el laboratorio del Ministerio de Energía y Minas para evaluar las variables que determinan el rendimiento y calidad del carbón vegetal. A la información obtenida se le corrieron una serie de análisis; primero un Análisis de Varianza Univariado con su respectiva prueba de medias a todas las variables evaluadas, segundo un Análisis Multivariado de Varianza a todas las variables de forma conjunta y por último un Análisis no Paramétrico (prueba de Freedman), únicamente a las variables que determinan la calidad (contenido de humedad, contenido de cenizas, contenido de materias volátiles, contenido de carbono fijo y poder calorífico).

Los resultados de todas las variables muestran gran similitud entre si, siendo para el caso del rendimiento el mejor resultado es expresado por Gmelina arborea Roxb. con un valor promedio de 35.45% en peso base seca; para las variables de calidad los mejores valores los expresaron para el contenido de humedad Gmelina arborea Roxb. con 2.98 %, para el contenido de materias volátiles Gmelina arborea Roxb. con 40.72%, para el contenido de cenizas Eucalyptus saligna Sm. con 2.23%, para el contenido de carbono fijo Gmelina arborea Roxb. con 53.86% y para el poder calorífico Eucalyptus saligna Sm con 7,602.02 Kcal/kg Analizando los resultados por si solos dan la idea que la mejor especie es Gmelina arborea Roxb.; pero las pruebas estadísticas realizadas indican que no existen diferencias significativas en el rendimiento ni en las variables que determinan la calidad del carbón vegetal producido a partir de las cinco especies forestales evaluadas.

Dados estos resultados se concluye que para el rendimiento y las variables que determinan la calidad del carbón vegetal producido a partir de las cinco especies evaluadas son desde el punto de vista estadístico iguales.

## 1. INTRODUCCIÓN

La población de América Central depende en gran medida de los recursos forestales para satisfacer sus necesidades energéticas; en el año 1984 la biomasa, principalmente la leña (y el carbón vegetal como un subproducto de esta) constituyó el 65% de la energía total consumida en el istmo. Mientras se estima para la misma fecha la cubierta vegetal de bosque denso había sido reducida al 34% del territorio total (13).

Estos consumos son resultado de un uso intensivo y una presión creciente en regiones relativamente pequeñas densamente pobladas. La solución para la problemática de la deforestación no radica solamente en dejar de cortar los árboles e implementar proyectos de reforestación; sino en también buscar y encontrar la solución a la demanda energética para la población. Por ello es necesario buscar alternativas que permitan aprovechar racional y eficientemente el recurso bosque mientras llega una solución más consecuente con el entorno ecológico.

Como una alternativa a la problemática planteada, diversas instituciones de la región se dedican a estudiar y promover especies introducidas de rápido crecimiento, que puedan ayudar a satisfacer las necesidades energéticas de la población, por lo que es necesario validar el uso e importancia energética de estas especies a través de la investigación.

En esta investigación se determinó la cantidad y calidad energética de cuatro especies forestales de rápido crecimiento, que han demostrado buena adaptación y aceptación en nuestro medio (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maid, *Eucalyptus saligna* Sm., *Gmelina arborea* Roxb. y *Casuarina cunninghamiana* Miq). Los resultados del rendimiento y la calidad de estas especies se compararon con los de *Quercus peduncularis* Née; que es la especie más utilizada a nivel nacional

para la producción de carbón vegetal.

Los resultados de esta investigación indican que los valores más altos en cuanto al rendimiento de carbón vegetal los presentó Gmelina arborea Roxb. la que presenta un rendimiento promedio del 35.45% en peso base seca. Con respecto a la calidad, los resultados obtenidos de las distintas variables que la determinan, expresan valores similares para todas ellas. Una de las variables de calidad más representativas es el poder calorífico, el cual indica que la mejor especie de las cinco evaluadas es Eucalyptus saligna Sm. el cual obtuvo en promedio un poder calorífico de 7,602.02 Kcal/kg.

Tanto en rendimiento como en calidad del carbón vegetal los resultados muestran similitud entre las especies de rápido crecimiento (Eucalyptus grandis W. Hill ex Maid, Eucalyptus saligna Sm., Gmelina arborea Roxb. y Casuarina cunninghamiana Miq.) y el encino (Quercus pedunculata Néé), esto se confirma con los resultados del Análisis Univariado de Varianza, el Análisis Múltiple de Varianza y el Análisis no paramétrico efectuados a los resultados, los cuales indican que para la presente investigación estadísticamente no existen diferencias significativas entre las especies evaluadas para ninguna de las variables de interés. En base a esto se recomienda utilizar las especies de rápido crecimiento evaluadas (Eucalyptus grandis W. Hill ex Maid, Eucalyptus saligna Sm., Gmelina arborea Roxb. y Casuarina cunninghamiana Miq.) para producir carbón vegetal.

## 2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los aumentos considerables de los precios de los combustibles derivados de fuentes fósiles, obligan a los países en vías de desarrollo, que no cuentan con dichas fuentes, a preocuparse por investigar y desarrollar nuevas fuentes de energía y hacer a la vez un uso más eficiente de las fuentes tradicionales.

En Guatemala, la leña y el carbón vegetal ocupan una posición importante como fuentes tradicionales de energía, con un aporte de 65% en el balance energético nacional (8). Pues más del 79% de los hogares guatemaltecos consumen leña para cocinar sus alimentos y de manera indirecta lo hace toda la población a través del consumo de tortillas y pan cocidos con leña (14).

Centrados en encontrar satisfactores para esta gran demanda energética diversas instituciones se han dado a la tarea en promover y establecer plantaciones energéticas con especies introducidas de rápido crecimiento, entre las cuales se incluyen las cuatro especies evaluadas (Eucalyptus grandis W. Hill ex Maid, Eucalyptus saligna Sm., Gmelina arborea Roxb. y Casuarina cunninghamiana Miq.), las cuales han demostrado en nuestro medio buena adaptación y desarrollo. Estas especies a pesar de sus características (rápido y robusto crecimiento, buen poder calorífico, capacidad de rebrote, resistencia a plagas y enfermedades y otras) no podrían solventar por sí solas la gran demanda energética; por lo que es necesario buscar formas de potenciar o mejorar su poder calorífico. Una manera de potenciar y mejorar el poder calorífico de la madera es a través del proceso de carbonización; se sabe por referencia de experiencias en otros países, que es posible obtener carbón de buena calidad de las especies evaluadas.

### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 Marco Conceptual**

##### **3.1.1 Historia del Carbón Vegetal:**

El carbón vegetal ha sido un importante combustible de uso doméstico durante muchos años independientemente del modo de producirlo. Su uso mayor ha sido en cocinas, en giras de recreo, sin darle ninguna importancia como fuente energética renovable que puede substituir a los combustibles de origen fósil, hasta que recientemente la crisis energética proveniente del agotamiento del petróleo, ha inducido al hombre a buscar nuevas fuentes de donde obtener su demanda energética, y el carbón vegetal constituye una importante fuente de energía renovable en algunos países (6)

El carbón vegetal, se produce mediante la quema de la madera, en condiciones controladas del consumo de oxígeno durante la combustión. Durante el proceso de carbonización de la madera, se puede recuperar subproductos útiles que tienen una aplicación energética tan importante como la del carbón vegetal (15).

En Brasil, el carbón vegetal se ha venido utilizando desde 1918 en la siderurgia, desde entonces se le ha considerado como una materia prima de segunda categoría, de bajo costo, obtenida por actividades secundarias del descombramiento forestal natural. Pero con la dependencia de las fuentes energéticas convencionales que se agotan, el carbón ha tomado la importancia debida tanto en éste país como en otros (3).



### **3.1.2 Madera como Fuente de Energía:**

El hombre desde tiempos remotos ha utilizado combustibles no renovables para sus fines. La civilización industrial obliga al ser humano a aumentar drásticamente el consumo de combustibles fósiles a tal punto que las reservas se agotarán en los próximos 50 a 100 años. Apenas una cantidad pequeña de energía solar recibida por la tierra cerca de  $40 \times 10^{12}$  W, es absorbida por los vegetales, y se estima que la energía solar que incide sobre la tierra en un período de 7 días sería equivalente a la energía contenida actualmente en las reservas fósiles. De esta manera podemos observar la importancia que tiene la energía que se puede obtener de los vegetales (18).

La madera como combustible presenta las ventajas y desventajas siguientes: (18)

#### **Ventajas**

- Para los países en desarrollo es el combustible más barato, tanto por tonelada como por unidad de calor.
- Se usa para producirlo mano de obra no calificada, generando así fuentes de trabajo.
- Su almacenamiento es posible en espacio libre y abierto.
- Contiene bajo porcentaje de cenizas y azufre.

#### **Desventajas**

- Exige mano de obra, elevando los costos en países de salarios elevados.
- Necesita de planificación, organización intensiva y sobre dependencia de instituciones

como el Departamento Forestal, La Policía Nacional, etc.

- El poder calorífico es inferior al de otros combustibles fósiles .

### 3.1.3 Composición de la Madera

El comportamiento de la madera en la carbonización puede ser representado por la sumatoria de los comportamientos aislados de sus tres componentes que son: Celulosa, Hemicelulosa y Lignina. Sus efectos interactivos algunas veces pueden despreciarse y el estudio de cada uno representa una buena aproximación del fenómeno como un todo (5).

La madera está compuesta principalmente de carbono, hidrógeno y oxígeno. Existen también, el nitrógeno y las sales minerales, los cuales juntos representan menos del 1% (5).

Existe variación en las informaciones obtenidas por diversos autores en la proporcionalidad de los componentes de la madera, pero, en términos generales se consideran como promedio los valores que se representan a continuación en el cuadro 1.

**Cuadro 1: Composición Química y Proporción de los componentes Principales de la Madera en Valores Promedio.**

Composición Química	Rango %	Componentes	Rango %
Carbono	40 - 60	Celulosa	30 - 50
Oxígeno	34 - 45	Hemicelulosa	20 - 40
Hidrógeno	4 - 7	Lignina	20 - 31
Nitrógeno y Cenizas	1	Extractivos	1 - 8
Nitrógeno	0.1 - 0.5		
Cenizas	0.4 - 1.0		
Agua	20		

Fuente: Curso de Carbón Vegetal para Centroamérica (5).

Según Carrillo (2), la composición básica de la madera se da con las siguientes proporciones:

Celulosa	50%
Lignina	20-30%
Hemicelulosa	20-30%
Proteína, Ceras, Pectina, Grasas, etc.	5%

Otros autores compilados por Resende Penedo (18), no consideran la cantidad mínima de Nitrógeno y otros elementos, además no mencionan la proporción de los componentes de bajo peso molecular encontrados en la cáscara, tales como: Terpenos, Oleos, Esencias, Resinas, Fenoles, Taninos, Grasas y Colorantes. Dando la siguiente proporción de la composición química y los componentes principalmente de la madera:

Carbono	50%	Celulosa	50%
Hidrógeno	6%	Hemicelulosa	20%
Oxígeno	44%	Lignina	30%

La composición elemental de la madera varía dentro de los siguientes aspectos: Especie Vegetal, la edad de la madera, del terreno, etc. (5).

### 3.1.4 Carbonización de la Madera y de sus Componentes

#### 3.1.4.1 Teoría de Carbonización

La carbonización de la madera consiste en la transformación en carbón por la acción del calor y en presencia de cantidades controladas de oxígeno. Durante el proceso se desprenden vapor de agua, líquidos orgánicos y gases no condensables, quedando como residuo sólido el Carbón (5).

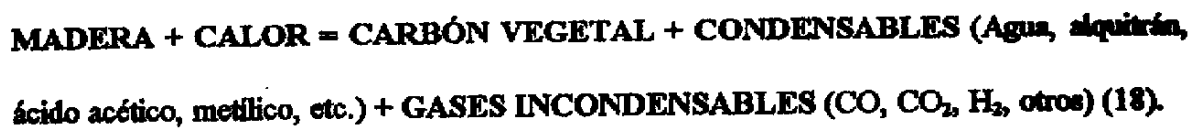
Durante la carbonización, todos los componentes de la madera son extensivamente modificados. La destilación seca de la madera se da en ausencia completa de oxígeno, en tanto que la pirólisis ocurre cuando se tiene una cantidad disponible de oxígeno, suficiente para transformar toda la madera en vapores y gases, dejando como residuo apenas óxido de minerales denominados Cenizas. En procesos convencionales de carbonización, donde se controla el aire, siempre ocurre quema de una parte de la madera al ser carbonizada, el calor generado es responsable de la transformación del resto de la madera en carbón. La cantidad de aire que tiene que entrar al horno, se tiene que medir, para obtener carbón de buenas características sin que existan quema excesiva de la madera. Este control se hace con base al avance del frente de carbonización, lo cual indica la coloración del humo de la chimenea del horno. En los procesos de carbonización industrial no convencional, utilizan aparatos sofisticados para recuperar subproductos de la carbonización de la madera (18).

Las muchas reacciones químicas que ocurren con la carbonización, están relacionadas directamente con la temperatura así tenemos que a temperaturas abajo de 100 ° C. hay pérdida de agua Higroscópica, arriba de ese valor, hay pérdida de agua de constitución. Temperaturas encima de 200 ° C. se desprenden productos volátiles, tales como: Agua, Acido Acético, Metanol y Gases no Condensables como CO y CO<sub>2</sub>. Al aumentar la temperatura, las reacciones que se llevan a cabo son aún más complejas, afectando también el rendimiento del carbón pasando de 51.4% a 300 ° C. hasta 26.5% a 1,000 ° C. También hay modificaciones físicas como: Abertura y coalescencia de poros, fisuración y disminución de la densidad relativa, modificaciones en tamaño y distribución de los poros (18).

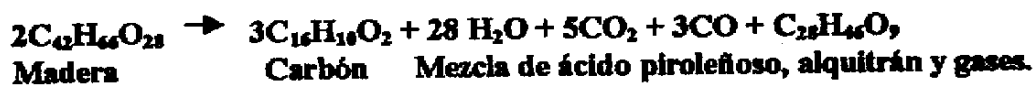
Carrillo (2), establece que se involucran dos etapas en la transformación de la madera en

carbón: La desecación y la carbonización. Al encender la leña, se genera calor secando así la madera, regulando la entrada de aire, se mantiene en promedio una temperatura del horno de 320°C. Si la madera no ha sido previamente secada, se requiere mayor temperatura, para eliminar el exceso de humedad, consumiendo más madera y por ende bajan los rendimientos.

La lignina, es el más estable de los componentes químicos de la madera y por lo tanto es el que predomina en el carbón al final del proceso de carbonización. En términos generales, la carbonización de la madera, se puede resumir en la ecuación siguiente:



En otra compilación, hecha por Resende Penedo (19), se establece, que aunque el trabajo de enumerar, identificar y formular todos los productos obtenidos, sería bastante exhaustivo pues se han identificado 213 diferentes compuestos, pero para hacer referencia en forma general a la carbonización de la madera a 400° C. Por medio de fórmulas, se hace referencia a la ecuación elaborada por Klason y otros citados por Klar, en la compilación de Resende Penedo (19) es la siguiente:



En la ecuación anterior no se puede identificar la cantidad de alquitrán y de ácido piroleñoso, en su mezcla total. Dentro de esta ecuación, se menciona la humedad, el contenido de cenizas y el de materias volátiles, pero tiene la ventaja de mostrar que el proceso de carbonización

de la madera consiste básicamente, en concentrar el carbono y expulsar el oxígeno en el carbón (19).

El carbón vegetal consigue retener el 57% del carbono inicial contenido en la madera, el carbono restante se encuentra en los gases, el cual es perdido. Por otro lado, cerca del 89% del oxígeno de la madera es expulsado en gases y líquidos condensables, aumentado con esto su poder calorífico. Teóricamente, el rendimiento en carbón es de 34.5% conteniendo el 82.1% de carbono a temperatura de 400° C. (5).

### 3.1.4.2 Carbonización de los Componentes de la Madera

a) **Carbonización de la Celulosa:** Es el componente más fácil de aislar, produce sobre atmósfera de N<sub>2</sub> 34.2% de rendimiento de carbón a 300° C., al aumentar la temperatura a 600° C, este rendimiento disminuye a 5%. El empleo de vacío durante la carbonización disminuye el rendimiento de carbón, pero aumenta el de alquitrán. La degradación de la celulosa ocurre entre 325 y 375° C. (5).

b) **Carbonización de la Hemicelulosa:** Según Browne, citado por Beall y Eickner, referidos en (5) estableció, que la hemicelulosa es el componente responsable de la formación de ácido acético.

Domansky y Rendos, citados por los mismos autores, concluyeron que la hemicelulosa es el componente menos estable, debido a su naturaleza amorfa. Su descomposición sucede entre 225 y 325° C.

Fengel, establece que en la primera prueba de descomposición, la molécula se fragmenta y en la segunda prueba ocurre la despolimerización de cadenas pequeñas, formando unidades de monómeros, con gran formación de volátiles. Los productos formados a 500° C., el rendimiento es de apenas del 10% de carbón, contribuyendo con esto, la hemicelulosa, muy poco en la formación de carbón (5).

c) **Carbonización de la Lignina:** Según Resende Penedo (18) la lignina es el componente más estable, la cual se descompone gradualmente entre 250 y 500 °C. Según Brito y Barrichelo citados por Resende Penedo (18), el valor de la lignina en la madera tiene una sensible influencia en el rendimiento del carbón y también en el valor de carbono fijo.

El contenido de carbono fijo del carbón, es afectado por el comportamiento de la cantidad de lignina durante la carbonización, pues es el principal responsable de la formación de carbón vegetal, además, también interviene en la formación de alquitrán, gases no condensables, etc. Un rendimiento de 55% de carbón a 450-550° C., se le atribuye el contenido de lignina de la madera (5).

### 3.1.4.3 Aspectos Técnicos de la Carbonización

a) **Influencia de la Temperatura sobre los Rendimientos de los Productos de la Carbonización:** Se han realizado varias investigaciones al respecto, sobre los rendimientos en carbón, líquidos y gas no condensable. Al aumentar la temperatura, aumenta el rendimiento del carbón, sin embargo, producido a menor temperatura tiene mayor contenido de materias

volátiles que el carbón producido a temperatura alta, pero aumenta el contenido del carbono fijo al aumentar la temperatura (5).

La formación de gases aumenta, con el aumento de la temperatura, también la composición química de esos gases depende sensiblemente de dicha temperatura. A un principio son gases oxigenados, al aumentar la temperatura se forman gases hidrogenados, como el metano. Joun, citado por Klar, observó que hasta  $280^{\circ}\text{C}$ . se desprenden gases oxigenados, y a medida que aumenta la temperatura, los gases hidrogenados predominan. El 90% del alquitrán se produce a  $200$  y  $340^{\circ}\text{C}$ . (5).

b) **Influencia de la Velocidad de Calentamiento:** Con la velocidad o incremento del calentamiento, varían los rendimientos de carbón, alquitrán y carbono fijo. Con temperatura constante y diferentes tasa de calentamiento, el rendimiento en carbón de carbono fijo y de alquitrán, varía sensiblemente. Al disminuir la tasa de calentamiento aumenta el rendimiento de alquitrán (5).

c) **Influencia de la Presión:** El efecto de variación de atmósfera, ejerce notables influencias sobre los rendimientos de los diversos productos de la carbonización. Experiencias de Violette, obtenidas en tubos sellados determinó que el rendimiento de carbón bajo presión es mayor que a presión atmosférica, ya que los distintos compuestos gaseosos permanecen retenidos en el carbón, además el rendimiento a  $340^{\circ}\text{C}$ . bajo presión es casi 3 veces mayor que aquel obtenido a presión constante ambiental (5).



### 3.1.5 Características y Propiedades del Carbón Vegetal

El carbón vegetal tiene baja densidad, alta reactividad, baja resistencia mecánica, bajo porcentaje de azufre, gran fragilidad y otras características en comparación con el coque (18).

Las propiedades más representativas del carbón, son: Composición química, densidad, reactividad y resistencia mecánica. Aunque se puede incluir otras como la densidad y porosidad, absorción de humedad, poder calorífico, etc. menos representativas (5).

#### 3.1.5.1 Reactividad

Autores compilados por Resende Penedo (18), la definen como, la velocidad con la cual, a una temperatura determinada, el carbono reacciona con un gas conteniendo oxígeno (tal como el aire, CO<sub>2</sub>, vapor de agua, el propio oxígeno o mezcla de estos), haciéndolo pasar a través de una capa de carbón con granulometría y altura previamente fijadas. La reacción más importante es la establecida por Bourdouard.



Otra definición, es la capacidad que tiene el carbón vegetal de generar el poder reductor del gas, es decir el carbono del carbón, reacciona con el dióxido de carbono para producir monóxido de carbono. Se espera que un carbón de alta reactividad, reacciones en alto horno a baja temperaturas y la reducción del mineral de hierro, con velocidad baja. Al disminuir la reactividad del carbón, provoca un aumento de la temperatura en la zona de reserva térmica, favoreciendo con ello, la reducción del mineral hierro de baja reductibilidad (5).

### 3.1.5.2 Composición Química

En términos de análisis químico, el carbón se compone de carbono fijo y materias volátiles, los cuales son afectos principalmente por la temperatura de carbonización. Al aumentar la temperatura de carbonización, aumenta la proporción de carbono fijo y disminuye el contenido de materias volátiles, a la vez que también lo hace el rendimiento de carbón vegetal. La variación de la temperatura en el interior del horno fijo de una misma horneada. Además el proceso de carbonización es afectado por la velocidad y dirección del viento, etc. Con equipo de calentamiento externo y a través de un gas no oxidante, se puede controlar la temperatura y obtener así carbón de un carbono fijo determinado (19).

a) **Humedad:** El carbón es relativamente higroscópico y su humedad depende de dos factores: Temperatura en que fue obtenido y Temperatura en al cual está expuesto. Se reporta la humedad del carbón como la pérdida de peso experimentada por el carbón cuando es sometido en estufa a temperatura de 105° C por 2 horas (18).

b) **Materias Volátiles:** Estos materiales, están compuestos por H, CO<sub>2</sub>, usa una temperatura de 950 ° C. teniendo el cuidado de evitar oxidación del carbón (18).

El mayor efecto de su eliminación, en alto horno o fuera de él, se encuentra en la modificación estructural del carbón. Los cambios de las características físicas (porosidad, diámetro medio de los poros, área específica total, etc.) por la eliminación de volátiles puede

alterar su comportamiento en alto horno (5).

c) **Cenizas:** Es el residuo de óxidos minerales obtenidos por combustión completa del carbón, permaneciendo 6 horas en la mufla a  $750^{\circ}\text{C}$  (18).

El carbón vegetal, donde el contenido de cenizas es siempre bajo, su efecto sobre la composición final de la escoria y el volumen de la misma no es tan importante cuando su efecto estabilizador es sobre la reacción de  $\text{C} - \text{CO}_2$  (15).

d) **Carbono Fijo:** Al determinar el valor de materiales volátiles, parte del carbono sale con gases como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  e hidrocarbonatos. Otra cantidad de carbono es la responsable de la formación de la masa amorfa y como no sale junto con al materias volátiles. A medida que la temperatura de carbonización aumenta, el contenido de carbono fijo aumenta pasando de 52.3% a  $200^{\circ}\text{C}$ , a 96.4% a  $1,100^{\circ}\text{C}$  (18).

Según Gómez y Matos citados en la referencia (15), es el efecto de la cantidad de carbono que se presenta en el carbón, es reflejado principalmente en la utilización del horno por unidad de volumen de carbón producido.

### 3.1.5.3 Fragilidad

Es la propiedad del carbón vegetal de generar finos, cuando esta sujeto a abrasión y quebraduras. Carbón con alta fragilidad, preocupa a personas involucradas en su producción,

transporte, almacenaje y consumo (18).

Durante el manejo del carbón vegetal, desde la producción hasta su entrada en alto horno, son generados alrededor de 25% de finos en peso abajo de 10 mm. Estos 25%, según Olivera, citado en la referencia (15), se distribuyen así:

En la carbonería	3.7%
Cargado y transporte	5.3%
Calor	9.7%
Almacenaje	6.3%
TOTAL	25.0%

Para la clasificación del carbón vegetal en su fragilidad, se utiliza la siguiente escala, según se establece en la referencia (3):

	Porcentaje de pérdida (abajo de 20 mm)
Muy frágil	30
Bastante frágil	25-29
Medio frágil	15-24
Poco frágil	10-15
Muy poco frágil	10

#### 3.1.5.4 Resistencia Mecánica

A medida que la temperatura de carbonización aumenta, también lo hace la resistencia mecánica del carbón a la compresión. La generación de finos depende del diámetro y longitud, además de la humedad de la madera, cuando el carbón es sometido a compresión (18).

El ensayo de compresión es utilizado para medir la resistencia longitudinal y transversal del carbón, con la finalidad de prever su comportamiento mecánico cuando es sometido a una carga.

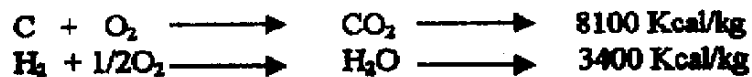
Según Assis, citado en la referencia (5), estableció que el carbón con baja resistencia mecánica, humedad elevada el alto contenido de volátiles, sufre una alteración dentro del horno de fundición alterando la distribución granulométrica, reduciendo así la penetración de la carga. La posición de la carga al cuerpo de prueba influye sobre el resultado de la resistencia, ya que se tiene mayor resistencia en el centro del cuerpo de prueba que en los bordes. La resistencia disminuye cuando la temperatura de carbonización aumenta de 300 a 500 ° C. debido a la eliminación de volátiles, aumentando la porosidad del carbón; en tanto que arriba de 500 ° C. aumenta la resistencia.

### 3.1.5.5 Absorción de Humedad

El carbón absorbe humedad del ambiente, perdiéndola parcialmente con al exposición al sol, esta humedad influye mucho en la resistencia mecánica. El carbón absorbe humedad de la atmósfera, principalmente durante las lluvias, dependiendo de la humedad relativa. A mayor contenido de humedad aumenta la generación de finos en prueba de tamboramiento (5).

### 3.1.5.6 Poder Calorífico

Según Resende Penedo(18), se define como el número de calorías liberadas en la combustión completa de una unidad de masa combustibles, siendo expresado en Kcal/kg para combustibles sólidos y líquidos en Kcal/m<sup>3</sup> para combustibles gaseosos. Es de mucha importancia cuando se piensa usar el carbón como sustituto de combustibles fósiles. Las reacciones consideradas en el poder calorífico del carbón vegetal son las siguientes:



Carbón producido a 500° C. tiene mayor poder calorífico que carbón producido a 300 y 700 ° C y entre estos el 700 ° C tiene mayor poder calorífico. Esto indica que el poder calorífico del carbón vegetal esta afectado por la temperatura de carbonización a la cual se produjo (5).

### 3.1.6 Calidad del Carbón Vegetal

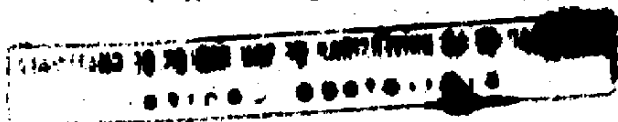
Entre los indicadores tradicionales de la calidad del carbón vegetal, cuenta el sonido metálico que da cuando tropieza con un objeto duro y la fractura lisa al romperse, carece de sabor y olor, no mancha objetos que se froten contra la superficie de la fractura, enciende fácilmente y arde sin producir humo. El carbón tiene poca tendencia a absorber colores, gases y olores (15).

Las proporciones óptimas de los componentes químicos de un carbón, para considerarlo de buena calidad, debe estar dentro de los rangos siguientes (15).

Humedad	2-4%
Materias volátiles	18-23%
Cenizas	1-4%
Carbono fijo	74-81%

Carbón con cantidades relativamente bajas de cuerpos volátiles y en consecuencia con mayor contenido de carbón fijo, es deseable para usos industriales especializados, al poseer un carbón más del 24% de cuerpos volátiles se produce humo al arder. La especie de madera influye en la calidad química del carbón, y la densidad y estructura de dicha especie influye en la calidad física del carbón (15).

Según Resende Penedo (18), en los procesos convencionales de producción del carbón



vegetal, tanto el rendimiento como la calidad física y química depende no solo de las características de la madera, sino de la habilidad de los operarios. De manera general, la calidad del carbón depende de : La especie de madera, del tamaño de la madera y del método de carbonización. La especie de madera es importante, pues la madera dura producirá carbón denso. El tamaño de la madera influye, en la calidad, pues madera en pedazos grandes genera carbón resistente a la compresión. Generalmente un carbón de buena calidad debe ser:

**Físicamente:** Denso, poco frágil, de granulometría uniforme y suficientemente resistente a compresión.

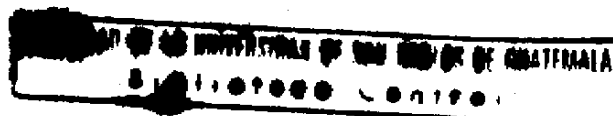
**Químicamente:** Alto porcentaje de carbono fijo, bajo porcentaje de cenizas, bajo porcentaje de fósforo. Evitar mojarse durante su manejo.

### 3.1.6.1 Efecto de la Especie y Forma de la Madera sobre la Calidad

Todas las especies de madera, producirán carbón de buena calidad con un contenido de carbono fijo relativamente alto 75-82%, cuando las condiciones de carbono influye sobre la calidad del carbón, no así, el tamaño de los pedazos a carbonizar (15).

### 3.1.6.2 Efecto del Tamaño y Tipo de Horno sobre la Calidad del Carbón

Según Hicock, citado en la referencia (15), establece que los hornos de 5 a 12 cuerdas de capacidad parecen capaces de mayor producción por cuerda, en realidad los más pequeños,



pueden producir carbón de calidad satisfactoria para el mercado, siendo de cualquier tipo, siempre y cuando se maneje adecuadamente, principalmente los factores de tiempo y temperatura de carbonización.

### **3.1.6.3 Efectos del Tiempo y Temperatura de Carbonización sobre la Calidad del Carbón**

Puede producirse carbón de buena calidad a temperaturas de 510 y 570° C. aunque se produce de calidad aceptable a temperaturas un poco más bajas, pero se requiere más tiempo. La temperatura media del interior del horno afecta tanto la calidad como la cantidad de carbón, puesto que si se deja demasiado tiempo encendido se consume mayor cantidad de carbón, lo cual prácticamente no es conveniente desde el punto de vista económico (15).

Las características de la madera como la densidad, la cantidad de corteza y otras, como su estado seco o mojado, influye en la carbonización y la calidad del carbón. Madera que no está bien carbonizada, produce carbón de mala calidad, comúnmente llamado tizón, posee alto contenido de materiales volátiles y bajo porcentaje de carbono fijo. El control de la calidad del carbón debe de comenzar por la selección de la madera y seguir cuidando la preparación, la carbonización y la manipulación del carbón (5).

### **3.1.7 Rendimiento del carbón vegetal**

Los programas de entrenamiento del Tropical Products Institute (TPI), en siete países, han dado un rendimiento medio de carbón vegetal, incluyendo carbonilla fina, del 26% sobre base seca. El máximo peso de carbón vegetal obtenido en una sola horneada se observó en Guyana, en



donde se produjo 1.083 kg a partir de 3.852 kg (peso base seca) de tronquillos de tamaño regular, de una latifoliada muy densa. El contenido de humedad de la madera utilizada era de aproximadamente el 25% (base húmeda), con lo que se indica una eficiencia de conversión (sobre la base de peso seco) del 28.12%. Se han obtenido mayores eficiencia de conversión en la región árida litoral del Ecuador donde se ha observado una recuperación del 31.40% (7).

En el otro extremo, la carga más liviana de carbón vegetal obtenida de una sola hornecada ha sido en Sudán con residuos de costaneras de coníferas. Se produjo 287 kg de carbón vegetal a partir de una cantidad estimada de madera de 1,568 kg (peso seco), indicándose una eficiencia de conversión del 18.94%. El contenido de humedad de las piezas de madera recién aserradas era de aproximadamente del 57% (base húmeda).(7)

### 3.1.8 Hornos Usados en la Fabricación de Carbón Vegetal:

Según Rosende Penedo (18), el hombre primitivo observó que la madera se quemaba hasta quedar prieta y frágil, además, daba un combustible que no producía humo ni llamas, y generaba un calor más intenso que la madera.

Existen muchos modelos de hornos tales como:

- |                              |            |
|------------------------------|------------|
| - Por su calentamiento:      | Internos   |
|                              | Externos   |
| - Por su movilidad:          | Fijos      |
|                              | Portátiles |
| -Por su Flujo de Producción: | Continuos  |
|                              | Por Cargas |

Los más comunes son los fijos de calentamiento interno, llamados de superficie (5).

### 3.1.8.1 Hornos Media Naranja

Es uno de los más baratos, de simple construcción, debiéndose de construir en lugares planos. Se pueden construir solos o en conjunto. El material de construcción es el ladrillo de barro, cocido y argamasa de barro y arena o cal.

Este tipo de horno no posee chimenea, por lo tanto la entrada de aire y la salida del humo se hace a través de orificios llamados tatús, filas y bainas. Tiene 9 tatús, filas y bainas. Posee 9 tatús en la primera hilada, las filas, en número de 10, son orificios de 10 x 5 cm en la 19a hilada a partir del piso. Las bainas, en número de 7, se localizan en la 40a hilada (5).

El horno no requiere manutención especial, pero debe de tenerse cuidado con los ladrillos rotos y sustituirlos, se debe de embarrar periódicamente, para tapar grietas e impedir la entrada de aire durante la carbonización (5).

### 3.1.8.2 Horno de Albañilería como cámara externa

Es un horno cilíndrico como copa en forma de bóveda una chimenea lateral de tiraje central y una cámara de combustión externa. No posee tatús, filas o bainas, siendo que el control de la carbonización de la leña o cualquier otro tipo de material como corteza, ramas no hay necesidad de controlar la entrada de aires, simplificando la operación y disminuye el trabajo de albañilería (5).

Los gases calientes generados en la cámara son conducidos para el interior del horno, a través de 3 ductos construidos en tubos, dos laterales y una central, las salidas tienen rejillas, los cuidados no varían mucho del de media naranja, solamente el cuidado de la puerta de metal de la cámara, se deben limpiar las rejillas para permitir la buena circulación del aire (5).

El desarrollo de la carbonización es acompañado por el aspecto del color de humo, denso azulado continuo indica que el frente de carbonización alcanzó el fondo, también el calor de la pared indica el frente de carbonización. Se debe controlar, que no falte leña en la cámara y mantener una llama para controlar la entrada de aire, a mayor volumen de aire que entre en la cámara, la carbonización será más rápida y se quema mayor cantidad de materiales en la cámara (5).

### 3.1.8.3 Horno Horizontal

Según Roos y Roos (20), este horno tiene una capacidad aproximada de 6 m cúbicos de madera en promedio produce 30 a 40 kg de carbón/m cúbicos de madera.

En una área de 2 x 5 m se nivela y se limpia de vegetación, se colocan palos de madera de 1.5 m de largo y de 5 cm de diámetro, distanciados 0.5 m de ancho y 1 m de alto. Esta pila se orienta en dirección del viento, el material inflamable es mezclado entre la madera, luego se procede a colocarle una capa de 50 cm de vegetación tupida, dejando abiertos solamente los puntos de ignición. Después se coloca una capa de tierra de 15 cm .

Las paredes del horno se pueden reforzar con grandes trozas de madera o piedras, para

darle firmeza. Se hace un pequeño fuego cerca del horno y al estar bien encendido, se toman 2 a 3 paladas de madera ardiendo y se colocan en los puntos de ignición del horno, si después de 15 minutos no sale humo, se mueve la tierra de 4 a 5 puntos del horno, después se tapa el punto de ignición con vegetación y tierra, después de cierto tiempo de carbonización, el humo se torna tenue y escaso, se deben tapar las entradas de aire con tierra, a estas alturas el horno ha perdido la mitad de su volumen. Su enfriamiento se lleva a cabo durante 3 a 4 días, dependiendo de las condiciones atmosféricas, el tipo de madera y del tipo de tierra utilizada. Para descargar el horno se quita toda la tierra, existiendo algunos tizones encendidos y a los cuales se deben colocar tierra y no mojarlos para apagarlos (5).

#### 3.1.8.4 Horno Vertical

Esta clase de horno la madera se apila en varias capas verticales. El tamaño de la madera debe ser uniforme, o sea, del mismo largo. La carga de este horno puede ser de 5 a 100 m<sup>3</sup> de madera (20).

En un terreno plano y firme, varias capas de madera son apiladas en el centro del área. La madera es colocada alrededor del espacio designado como chimenea, entre estacas de madera. La pila circular de madera es cubierta por una capa de vegetación y por una de tierra, quedando abierta la chimenea (20).

El material de la chimenea es encendido, para regular el proceso de combustión, se agregan tierra por varios lugares alrededor del horno, la chimenea y las entradas son cerradas al concluir el proceso después de 2 a 3 días. El enfriamiento toma aproximadamente 2 días. Para una carga de

100 m<sup>3</sup> de madera, el proceso tardara aproximadamente 2 meses (20).

### **3.1.8.5 Horno de Metal**

Son dos secciones cilíndrica entrelazadas, una sobre otra y una cubierta cónica. Dicha cubierta posee 4 puertas circulares igualmente espaciadas para salir los vapores además posee tapaderas en la parte inferior se colocan los 8 canales con tapaderas donde entra aire y sale humo. Tiene 4 chimeneas cilíndrica de 3 m de largo aproximadamente.

**Ventajas de este tipo de horno:**

- a) Se pueden transportar hasta el lugar donde se encuentra la madera a carbonizar.
- b) No requiere grandes cantidades de madera para poder operar como sucede con los hornos fijos.
- c) El tiempo de producción es bastante corto dependiendo del tipo de madera y condiciones de carbonización.

### **3.1.9 Usos del Carbón Vegetal**

#### **3.1.9.1 Doméstico**

En el istmo centroamericano, el carbón vegetal se utiliza principalmente como combustible

doméstico y comercial para la cocción de alimentos (13).

### 3.1.9.2 Industriales

Para producir calor en usos industriales, el carbón puede substituir al carbón mineral y al aceite combustible, que en muchos países son muy caros y tiene que ser importado (7).

El carbón se utiliza (7):

- Para secar productos tales como: Lúpulo, tabaco y pescado, en horno especial.
- En estufas, para calentar agua que se hace circular a fin de conseguir el secado indirecto de muchos productos agrícolas.
- Como combustible, en el proceso de fabricación de cal y cemento.
- Para la extracción de metales, particularmente el hierro, a partir de sus minerales.

En Guatemala se usa actualmente en los Talleres Rossi, para forjar hierro, fundir aluminio, calentar crisoles, pero aún no ha llegado a substituir al coque. También en la industria de vidrio CAVISA usan carbón vegetal como un agente reductor y refinante del vidrio, eliminando el oxígeno del vidrio. Además asociado con otras materias, el carbón sirve para dar coloración ámbar al vidrio (13).

### 3.1.9.3 Metalúrgicos

Para la fundición de cobre, latón, hierro en lingotes, acero, níquel, aluminio, electromanganeso, plancha de blindaje y moldes de fundición (15).

### 3.1.9.4 Químicos

Bisulfuro de carbono, carburo de silicio, cianuro de potasio, carbono activado, carbono de calcio, cianuro de sodio, monóxido de carbono, pólvora negra, plásticos, cauchos, lápices, absorbentes de gas (15).

### 3.1.9.5 Otras aplicaciones importantes

- El carbón vegetal encuentra aplicación en la forja, el dibujo y la depuración de aguas de cloaca.
- En horticultura, los menudos de carbón (briznas y polvo) se emplean en cultivo de verduras para incrementar rendimiento, como suavizante del suelo, en el cultivo de flores, como: Rosas; también como acondicionador del suelo, productos farmacéuticos y alimentos para aves y animales. (17)

De los subproductos de la carbonización tenemos: El alquitrán, que es un excelente combustible y puede substituir los aceites combustibles y el diesel, sin mucho problema técnico, debido a su mayor densidad, viscosidad y buena temperatura es usado como combustible en la industria de cerámica, cemento, cal y en numerosos locales donde el uso de combustibles fósiles es onerosa (5).

El Carbón puede ser substituto del combustible óleo, en los procesos industriales usados en las calderas de vapor, hornos de cerámica, etc. Cada tonelada de alquitrán bruto substituye a 2/3 de tonelada de óleo combustible y cada tonelada de metanol proveniente del carbón substituye a 1/2 tonelada de gasolina (3).

### 3.1.10 Descripción de las especies en estudio

#### 3.1.10.1 Eucalyptus saligna Sm.

##### a) Descripción de la especie

Es un árbol grande de muy buena forma que puede alcanzar 40-50 m de altura o más y diámetro de 1,2 a 1,8 m La copa es abierta, irregular y extendida. Fuste recto, libre de ramas aproximadamente dos terceras partes de la altura total, base recta y raíces profundas. Posee lignotubérculos, corteza azulada mate o gris-verdosa, lisa, que se desprende en capas dejando expuesta una capa amarillenta. En árboles maduros la corteza en la base (hasta aproximadamente 9 m de altura) es gruesa, rugosa, persistente y agrietada. Ramillas delgadas, angulosas, de color verde amarillento a rosado.(4)

Hojas alternas (opuestas cuando jóvenes) con pecíolo delgado y corto, de inserción oblicua horizontal. Lámina foliar lanceolada, curvada, acuminada y delgada en la base, glabra, verde mate o verde oscuro en el haz y verde pálido en el envés (4).

Cabezuelas florales en umbelas simples, en la base de las hojas y a lo largo de las ramillas. Cada umbela contiene de tres a nueve flores blancas, usualmente siete, con un pedicelo corto o casi carente de él. Frutos o cápsulas seminales ligeramente acampanulados. Semillas pequeñas, de 1-2 mm de longitud, de color pardo mate; 2,5 a 3,5 millones/kg y 30 a 50 por ciento de germinación (4).

Madera rojiza, de textura áspera, grano recto, en algunos casos ondulado. Fácil de trabajar y con buen acabado (fácil de pulir) (4).



**b) Usos**

**Leña:** debido al rápido crecimiento y alta producción de biomasa es una especie con buen potencial para la producción de leña. En Brasil se le convierte en carbón para la fabricación de acero; en Guatemala se usa como leña para el secado de té (4).

**Madera de uso comercial y familiar:** madera moderadamente dura y pesada ( $0,55 \text{ g/cm}^3$ ), se utiliza para la construcción, armado de barcos, durmientes de ferrocarril, pisos, carpintería, tornería y obtención de chapas. Cuando el árbol ha crecido lentamente la madera puede presentar problemas en el pulpado semiquímico, lo que no sucede con madera de plantaciones de rápido crecimiento (4).

**Otros usos:** la especie se ha utilizado como ornamental y para sombrío y también en la producción de miel (4).

**c) Requerimientos ambientales**

**Temperatura:** en el área de distribución natural el clima es cálido a subtropical; áreas cercanas a las costas están libres de heladas, pero en zonas altas ocurren heladas durante el invierno. En áreas más frías pueden ocurrir hasta 60 heladas al año y la temperatura mínima absoluta puede descender hasta  $8^\circ \text{ C}$  bajo cero. La temperatura media anual es de  $15^\circ$  a  $21^\circ \text{ C}$ , y el promedio máximo en la estación cálida varía entre  $24\text{-}33^\circ \text{ C}$ . En Centroamérica se han plantado en lugares con temperatura media anual entre  $18^\circ \text{ C}$  y  $26^\circ \text{ C}$  (4).

**Precipitación:** en Australia, en el área de origen la precipitación varía entre 800 mm y 1800 mm con máximos en el verano en Queensland y distribución más uniforme al sur. En los sitios

experimentales en Centroamérica la precipitación generalmente es mayor de 1900 mm, pero con cuatro o cinco meses de déficit hídrico (4).

Altitud: en el área natural de distribución varía desde cerca del nivel del mar hasta 1100 m de Latitud, En Centroamérica se le ha plantado desde cerca del nivel del mar hasta 1200 msnm, con mayores rendimientos en zonas bajas (4).

Suelos: usualmente se desarrollan en suelos limosos o arcillosos moderadamente fértiles, húmedos pero no inundables. El material parental puede ser arenisca, conglomerados o basalto. El mejor desarrollo se presenta en suelos sueltos aluviales limo arenosos. En Centroamérica los mejores desarrollados se dan en suelos sueltos bien drenados de origen volcánico (4).

### 3.1.10.2 Eucalyptus grandis W. Hill ex Maid

#### a) Descripción de la especie

Es un árbol muy grande, de más de 40 m de altura 45-55 m en Australia y más de un metro de diámetro (hasta 2 m) en árboles plenamente desarrollados. La base es recta, raíces sin lignotubérculos y fuste recto y limpio en más de dos tercio de la altura total. La copa es clara y amplia cuando crece aislado o pequeña y comprimida cuando crece en plantaciones muy densas. La corteza es blanca grisácea o verde azulada, lisa y desprende en tiras largas. En la base, la corteza es fibrosa de color gris claro. Ramillas delgadas, angulosas y recubiertas de purina (cera) blanquecina (4).

Hojas alternas horizontales o colgantes con pecíolos delgados y cortos, lanceolada,

acuminadas y de base cuneada-peciolada, glabras, delgadas y con nervaduras secundarias finas y regulares, borde entero, ligeramente onduladas y brillantes, de color verde oscuro en el haz y verde pálido en el envés (4).

Flores blancas en umbelas, simples en la base. Cada umbela contiene de 5-12 flores de pedicelo corto o carente de él. Botones florales (yemas) más grandes que los de Eucalyptus saligna Sm., piriniformes, con una tapa cónica de punta redondeada, usualmente cubierta de purpura y base acampanulada (4).

Frutos o cápsulas seminales numerosas, de pecíolos cortos, periformes o cónicos. Semillas pequeñas, aproximadamente 2.5 millones/kg, de las cuales unas 650 000 son viables (4).

Madera rosada o pardo-rojiza clara, de grano recto, moderada fortaleza y durabilidad (4).

#### b) Usos

Leña: el crecimiento rápido y los altos volúmenes de madera que puede producir la hacen recomendable para producción de madera para leña. Por ejemplo, se le usa como combustible para ferrocarriles en Africa Oriental (4).

Madera de uso comercial: madera de peso variable (0,4 hasta 0,79 g/cm<sup>3</sup>), moderadamente dura, se raja y tuerce con facilidad al secar, lo que limita su utilización. Es fácilmente trabajable y se usa en ebanistería de mediana calidad. La madera se usa en cajonería y fabricación de embalajes. Puede utilizarse en construcción en general y en construcciones rurales, también como postes de cercas, aunque deben protegerse contra ataques de termitas. Debido a la

rectitud de los fustes, se emplean como postes de transmisión (eléctrica y telefónica). La madera se usa para la fabricación de pulpa para papel y tiene potencia para la obtención de chapas y tableros aglomerados. También se utiliza en cortinas rompevientos y otros usos menores (4).

Otros usos: la especie se usa como ornamental y como árbol de sombra. Las abejas que utilizan el néctar y polen de sus flores producen miel de buena calidad. El árbol se utiliza como cortinas rompevientos y como cercos vivos (4).

#### c) **Requerimientos ambientales**

Temperatura: En el área de distribución natural el clima es subtropical húmedo con temperaturas promedio altas en verano 24-32° C (máximas de hasta 40° C), temperaturas promedio bajas en invierno de 3 a 8° C y mínimas absolutas de 1 a 3 ° C. Lejos de la costa y en zonas altas se presentan heladas ocasionales. Si la disminución de la temperatura es gradual, la especie puede resistir hasta -5 ° C. La temperatura media anual debe ser superior a los 16 ° C. En Centroamérica se le ha plantado en sitios con temperatura media anual superior a los 20 ° C (4).

Precipitación: la precipitación media anual en su hábitat natural varía entre 100 y 1800 mm y hasta 3500 mm con estación seca corta y lluvias en el verano y otoño. Se ha establecido con éxito en sitios con más de 1100 mm y cinco a seis meses con déficit hídrico (4).

Altitud: en Australia crece desde el nivel del mar hasta unos 900 m cerca de la línea del Ecuador se han establecido plantaciones hasta los 200 m e inclusive hasta 2700 mmm en Kenya, pero a partir de los 2400 m probablemente Eucalyptus globulus es más productiva. En Centroamérica se han plantado hasta 1200 msnm (4).

**Suelos:** En Australia crecen sobre suelos húmedos profundos, bien drenados, aunque resisten períodos cortos de inundación, pueden crecer en suelos pobres, desde arcillosos a arenosos, ácidos. Es sensible a deficiencias de boro, los síntomas son similares a los de marchites por sequía (4).

### 3.1.10.3 Gmelina arborea Roxb.

#### a) Descripción de la especie

Es una especie decidua que puede alcanzar grandes dimensiones en condiciones favorables. La altura varía entre 12 y 30 m y diámetro máximo entre 60 y 100 cm. Cuando crece aislada desarrolla una copa amplia, ramas gruesas bajas y tronco muy cónico. En plantaciones densas desarrolla un fuste limpio de ramas bajas y menos cónico. El tronco es de base recta; corteza externa lisa, gris blanquecina; corteza interna amarillenta, moteada que pardea al aire rápidamente (4).

El sistema radicular es profundo, con una raíz principal pivotante cuando se desarrolla en suelos arenosos profundos. En suelos con impedimentos desarrolla un sistema radicular superficial (4).

Las hojas son simples, opuesta, grandes, oval-acuminadas y con la base cordada. EL haz es normalmente glabro o con muy poca velloidad. El envés presenta pubescencia estrellada de color amarillo-oscuro. Flores numerosas en panículas terminales, ramificadas y densamente pubescentes. La floración se produce en la época seca o al inicio de las lluvias. Frutos (drupas) abundantes, ovaliformes, de color amarillo cuando maduros, de 2-2,5 cm de longitud, con un endocarpo endurecido, que contiene de 1-4 semillas en sus cavidades. Normalmente solo una a

tres semillas son viables (4).

La madera es de grano recto, de color blanquecino, poco durable en contacto directo con el suelo (4).

#### b) Usos

Leña: Gmelina arborea Roxb. ha sido utilizada como leña en Malawi, Sierra Leona y Nigeria. En Malawi se utilizo para el secado de tabaco, mezclando leña verde (dos partes) y seca. En Costa Rica se le ha utilizado como leña en saleras, aunque debe estar bien seca para alcanzar altas temperaturas. La leña quema rápidamente y tiene un buen poder calorífico (al rededor de 20 000 Kj/kg o 4800 Kcal/kg). En Costa Rica, para madera de 34 meses se encontró un poder calórico de 19 124 KJ/kg y 0,81 por ciento de cenizas. La madera debe protegerse de los ataque de las termitas cuando se almacena al aire. Produce carbón que arde bien y sin humo, pero con abundantes cenizas (4).

Madera de uso comercial y familiar: la madera de gmelina es medianamente densa (0,48 g/cm<sup>3</sup>), poco atractiva pero fácil de trabajar, de gran durabilidad no se encoge ni distorciona en diferentes ambientes por lo que puede compararse con la madera de teca. Es utilizada en la manufactura de productos donde la estabilidad dimensional es importante. Por esta razón es una madera utilizada en la carpintería , ebanistería, paneles, instrumentos musicales, cajonería en general, tallado y otros. Además se utiliza en construcciones rurales, para postes, yugos y otros (4).

También se utiliza en la fabricación de pulpa para papel de buena resistencia, blanqueado o no. En Costa Rica la empresa Scot Paper basa actualmente su producción de papeles de uso

doméstico en pulpa proveniente de madera de Gmelina arborea Roxb.(4).

La madera también puede ser utilizada para obtención de chapas y madera contrachapada y en la fabricación de palillos de fósforos (4).

Otros usos: Las flores de la especie producen miel de excelente calidad. El follaje joven es apetecido por animales, quienes pueden producir daño a las plantaciones jóvenes o a los rebrotes por el ramoneó. Los frutos, hojas, flores, raíces y corteza son utilizados en sureste asiático como medicina para diferentes enfermedades, se plantan para la protección de campos cultivados, ya sea como cerco vivo o como parte de la cortina rompevientos. No se recomienda la plantación en terrenos de alta pendiente ya que al igual que la teca, el follaje denso disminuye considerablemente la presencia de otra vegetación, dejando el suelo susceptible a la erosión por el escurrimiento superficial. Igualmente, por tener hojas de área foliar grande concentra una gran cantidad de agua que puede causar daños al suelo. En zonas de poca pendiente se recomienda plantar asociada con cultivos anuales durante el primero o dos primeros años (4).

c) **Requerimientos ambientales**

Temperatura: En su rango natural de distribución las temperaturas mínimas absolutas están entre  $-1^{\circ}$  C y  $16^{\circ}$  C. Las heladas pueden dañarla en forma severa. Las temperatura media anuales oscilan entre  $24^{\circ}$  y  $35^{\circ}$  C. En Centroamérica se le ha plantado con éxito en sitios con temperatura media anual entre  $24^{\circ}$  y  $29^{\circ}$  C (4).

Precipitación: crece naturalmente en área con precipitación media anual entre 750 mm y 2000 mm aproximadamente. La precipitación óptima es de 1800 mm a 2300 mm aunque puede

crecer en sitios de hasta 4500 mm. Requiere de un período seco que puede variar entre dos y ocho meses. En Centroamérica se le ha plantado en zonas con precipitaciones desde 850 hasta 2700 mm anuales y cinco a ocho meses de déficit hídrico (4).

**Altitud:** la mayor parte de la zona natural de distribución natural se encuentra entre 90 y 900 m de altitud. En la parte occidental de Himalaya se le encuentra hasta 1200 m y en Sri Lanka se le ha encontrado hasta 1500 m. En Centroamérica se le ha plantado desde el nivel del mar hasta más de 800 m (4).

**Suelos:** Tiene mejor desarrollo y longevidad en suelos profundos, húmedos, bien drenados y con buen suministro de nutrimentos. Puede crecer desde suelos ácidos o calcáreos, hasta lateritas, pero el crecimiento se ve afectado en suelos superficiales, con capas endurecidas, impermeables, pedregosas, o en suelos ácidos muy lixiviados o arenas secas. Es muy susceptible a la competencia de malezas (4).

**Sombra:** Es una especie esencialmente heliófila, intolerante a la sombra (4).

#### 3.1.10.4 Casuarina cunninghamiana Miq.

##### a) Descripción de la especie

Es un árbol siempre verde de tamaño mediano a alto que puede alcanzar de 20 a 35 m de altura y 0,5 a 1,5 m de diámetro, de base ensanchada y sistema radicular profundo y bastante amplio. Fuste recto, con numerosas ramas curvadas hacia abajo que forman una copa irregular y poco densa, corteza gris oscura, fisurada y persistente, ramillas delgadas similares a alambres, de 8 a 18 cm de longitud, con seis a ocho aristas laterales muy finas que terminan en igual número de



hojitas escamosas semejantes a dientes. Inflorescencias masculinas y femeninas en racimos, poco conspicuas, en árboles separados. Frutos múltiples en conos pequeños ligeramente redondeados; cada fruto individual aloja una semilla pequeña alada. Dependiendo de la procedencia hay entre 500 000 y 1 500 000 semillas/kg (4).

La madera de la albura es blanca y la del duramen pardo rojiza con radios anchos, sufre encogimiento durante el secado. No es durable en contacto con el suelo (4).

#### b) Usos

Leña: produce leña de excelente calidad que quema bien y se puede utilizar en hornos de panaderías debido a que las cenizas retienen el calor por largo tiempo. La madera de Casuarina cunninghamiana Miq. tiene mayor poder calórico que Casuarina equisetifolia L. ex J R Q. & G. Forst. El valor calórico es de aproximadamente 20 000 Kj/kg (4 770 Kcal/kg) (4).

Madera de uso comercial y familiar: La madera es moderadamente pesada ( $0,58 \text{ g/cm}^3$ ), utilizable en ebanistería, tornería, paneles de madera, tonelería y mangos de herramientas y yugos para busycs (4).

Otros usos: se puede utilizar en la formación de cercos o setos vivos. Por su sistema radicular extenso se le utiliza en el control de la erosión en los bancos de los ríos. Aún que de poco valor alimenticio, las ramillas son utilizadas como forraje para ganado ovino y bovino. Las plantas jóvenes deben protegerse del ramoneó. Se emplean en la formación de cortinas rompevientos y barreras vivas (4).

c) **Requerimientos ambientales**

**Temperatura:** en el área de distribución natural la temperatura promedio máxima del mes más caliente varía entre 25° - 40° C y el promedio mínimo entre 0° - 15° C; la temperatura promedio anual varía entre 13° y 27° C. Puede soportar hasta 50 heladas por año (4).

**Precipitación:** la precipitación varía entre 500 y 1500 mm anuales pero debido a que crece cerca a cursos de agua, la precipitación sola no es indicativa de la humedad disponible. En Centroamérica se ha plantado en sitios con precipitación entre 900 y 2800 mm (4).

**Altitud:** en condiciones naturales crece desde el nivel del mar hasta 1000 msnm. Se le ha plantado hasta los 2000 msnm. En Centroamérica se le ha plantado entre 700 y 1200 msnm (4).

**Suelos:** variado, desde suelos limosos de aluvión, hasta suelos gravillosos incluyendo suelos pobres y sitios erosionados. Cuando se localiza a la orilla de los ríos las raíces tienen acceso a las aguas corrientes o a nacimientos de la misma (4).

3.1.10.5 **Quercus peduncularis Née**

a) **Ecología**

Las especies de Quercus spp. se adaptan a regiones con las siguientes condiciones de 1,000 a 2,700 msnm, temperatura de 18 a 24 ° C, de 1,000 a 2,000 mm de precipitación al año. Zona de vida predominante, bosques subtropicales húmedos y secos del altiplano guatemalteco (21).

b) **Usos**

Las especies de encino son principalmente utilizadas como leña y carbón (21).

## **3.2 Marco Referencial**

### **3.2.1 Ubicación Geográfica**

El parque Tecnológico Demostrativo de Difusión y Comercialización de Fuentes Nuevas y Renovables de Energía " EL FARO ", se encuentra ubicado en la 24 calle 21-12 zona 12 de la ciudad Capital, en dichas instalaciones se realizaron las pruebas de carbonización de las muestras; mientras que los análisis de laboratorio se realizaron en el laboratorio de química del Ministerio de Energía y Minas.

#### **3.2.1.1 Coordenadas**

Latitud Norte	14° 35' 25"
Longitud Oeste	90° 32' 34"

#### **3.2.1.2 Elevación**

Parque Tecnológico "EL FARO"                      1,495 msnm.

### **3.2.2 Zona de vida**

De acuerdo con el mapa de zonas de vida a nivel de reconocimiento realizado por INAFOR (MAPA INAFOR), el área de estudio se clasifica como Bosque Húmedo Subtropical (Templado) (bh -S(t)) (12).

### **3.2.3 Clima**

#### **3.2.3.1 Clasificación**

Según el sistema de clasificación climático Thornthwaite, corresponde el área experimental a la de semicálido, con invierno benigno, húmedo, bosque característico con invierno seco (B'b'Bi) (16).

#### **3.2.3.2 Precipitación**

La estación central del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), reporta precipitación pluvial media anual en los últimos 11 años en el área de estudio de 1,171.94 mm. (11)

#### **3.2.3.3 Temperatura**

La estación central del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), reporta temperatura media anual de los últimos 11 años en el área de estudio de 19.25° C (10).

#### **3.2.3.4 Humedad Relativa**

La estación central del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), reporta humedad relativa media anual de los últimos 11 años del área de estudio de 79.27 % (9).

#### 4. OBJETIVOS

##### 4.1 GENERAL

Evaluar las características que permitan concluir sobre el rendimiento y la calidad del carbón vegetal producido a partir de cinco especies forestales (Eucalyptus grandis W: Hill ex Maid, Eucalyptus saligna Sm., Gmelina arborea Roxb., Casuarina cunninghamiana Miq. y Quercus peduncularis Née).

##### 4.2 ESPECÍFICOS:

- 4.2.1 Estimar el rendimiento de carbón vegetal en peso base seca producido a partir de Eucalyptus grandis W: Hill ex Maid, Eucalyptus saligna Sm., Gmelina arborea Roxb., Casuarina cunninghamiana Miq. y Quercus peduncularis Née.
- 4.2.2 Determinar la calidad del carbón vegetal producido a partir de cinco especies forestales (Eucalyptus grandis W: Hill ex Maid, Eucalyptus saligna Sm., Gmelina arborea Roxb., Casuarina cunninghamiana Miq. y Quercus peduncularis Née).
- 4.2.3 Comparar el rendimiento y la calidad del carbón vegetal producido a partir de las cinco especies evaluadas (Eucalyptus grandis W: Hill ex Maid, Eucalyptus saligna Sm., Gmelina arborea Roxb., Casuarina cunninghamiana Miq. y Quercus peduncularis Née).

## 5. HIPÓTESIS

No existen diferencias estadísticamente significativas respecto al rendimiento y la calidad del carbón vegetal producido a partir de las cinco especies forestales evaluadas (Eucalyptus grandis W: Hill ex Maid, Eucalyptus saligna Sm., Gmelina arborea Roxb., Casuarina cunninghamiana Miq y Quercus peduncularis Née).

## 6. METODOLOGÍA

### 6.1 Descripción del área experimental

El área experimental se ubica en el Parque Tecnológico Demostrativo de Difusión y Comercialización de Fuentes Nuevas y Renovables de Energía " EL FARO " del Ministerio de Energía y Minas, ubicado en la 24 calle 21-12 zona 12 ciudad de Guatemala, bajo condiciones ambientales de 1,171.94 mm de precipitación promedio anual (11), a 1,495 msnm, temperatura anual promedio de 19,25° C (10) y 79. 27% de Humedad Relativa promedio anual (9), (todos los promedios anuales están calculados según la información de los últimos 11 años).

### 6.2 Tratamientos y Repeticiones

#### 6.2.1 Tratamientos

Los tratamientos consistieron en las cinco especies evaluadas:

<b>Eucalipto saligna</b>	<b><u>Eucalyptus saligna</u> Sm.</b>
<b>Eucalipto grandis</b>	<b><u>Eucalyptus grandis</u> W. Hill ex Maid</b>
<b>Melina</b>	<b><u>Gmelina arborea</u> Roxb.</b>
<b>Casuarina</b>	<b><u>Casuarina cunninghamiana</u> Miq.</b>
<b>Encino</b>	<b><u>Quercus pedunculata</u> Née</b>

#### 6.2.2 Número de repeticiones

Se efectuaron 5 horneadas, corriendo en cada una de ellas una repetición por cada

tratamiento, con lo que se corrieron un total de 5 repeticiones por tratamiento.

### 6.3 Diseño experimental

El diseño estadístico empleado fue el de bloques al azar, el cual se define con el siguiente modelo estadístico.

$$Y_{ij} = M + T_i + B_j + E_{ij}$$

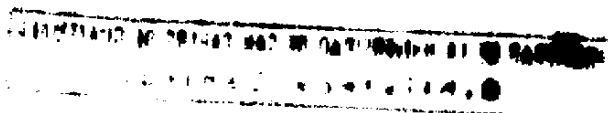
Donde:

$Y_{ij}$	=	Variable respuesta
$M$	=	Efecto de la media
$T_i$	=	Efecto del $i$ ésimo tratamiento
$B_j$	=	Efecto de la $j$ ésimo bloque
$E_{ij}$	=	Error experimental

### 6.4 Variables a medir

A cada muestra de carbón vegetal de las 5 repeticiones de cada especie se le determinaran las siguientes características:

- Rendimiento en base seca:** Consiste en la fracción de carbón vegetal obtenido de las muestras de madera carbonizadas en base seca.
- Porcentaje de humedad:** Es el contenido de humedad que contienen las muestras de carbón expresado en porcentaje.





- c) **Porcentaje de materias Volátiles:** Es el contenido en las muestras de materias que se volatilizan en siete minutos a  $950^{\circ}\text{C}$  expresado en porcentaje.
- d) **Porcentaje de cenizas:** Es el contenido de materias no combustibles de las muestras expresado en porcentaje.
- e) **Porcentaje de carbono fijo:** Es la diferencia entre el 100% del peso de la muestra y los porcentajes de materias volátiles + cenizas + humedad.
- f) **Poder calorífico:** que consiste en el número de calorías liberadas en la combustión completa de una unidad de masa combustible, siendo expresado en Kcal/kg (19).

\* el procedimiento para la determinación de las variables a medir se basan en métodos según las normas ASTM y se detallan en el apéndice.

## 6.5 Tipo de horno

El horno empleado para la carbonización de las muestras de las diferentes especies, fue del tipo horizontal revestido de ladrillo tayuyo, el cual consiste en cuatro paredes dobles y piso de ladrillo, provisto de 6 respiraderos (dos al frente y dos en cada uno de sus costados) y una chimenea en la parte posterior lo cual sirve para regular el flujo de aire en el interior, las dimensiones interiores del horno son  $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.5\text{ m}$  lo que nos da un volumen neto de  $1\text{ m}^3$ .

## 6.6 Recolección y preparación de las muestras

Se recolectaron las muestras de todas la especies mencionadas, las de Casuarina cunninghamiana Miq en la plantación de esa especie del parque " EL FARO, las de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maid y Eucalyptus saligna Sm en la Escuela Nacional Central de Agricultura, las de Gmelina arborea Roxb. en la Finca las Margaritas Sto. Domingo Suchitepéquez y las Quercus peduncularis Née de bosque natural de Villa Nueva.

### 6.6.1 Tamaño de las muestras

Diámetro: de 12 a 20 cm

Largo: de 25 cm

### 6.6.2 Preparación de las muestras

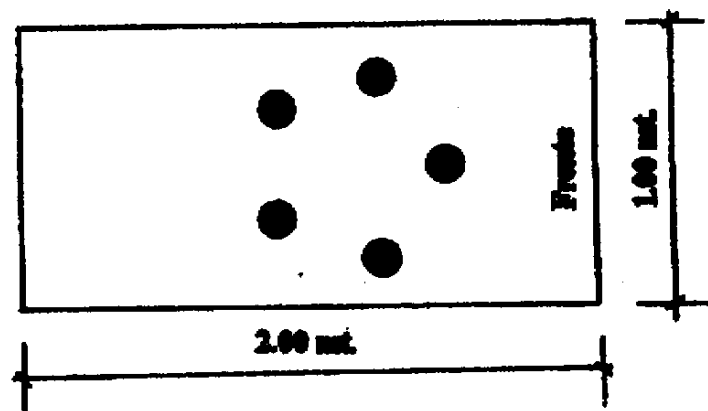
Todas las muestras de las cinco especies colectadas fueron descortezadas y cortadas en trozos de 25 cm de largo. La madera se colocó dentro de recipientes metálicos de 25 cm de altura y 15 a 20 cm de diámetro (dependiendo del diámetro de la madera), estos recipientes fueron de antemano identificados con un números correlativos y perforados por todas partes, a fin de permitir el contacto del fuego y el calor con la madera del interior al momento de la carbonización, sin que las muestras se revolvieran entre sí o con la madera del horno.

## 6.7 Carbonización de las muestras

La carbonera se llenó en cada carbonización con madera de *Eucalyptus saligna* Sm. y revuelta con esta se colocaron los recipientes metálicos conteniendo las muestras. Los recipientes fueron distribuidos en el centro de la carbonera (tal como lo muestra la figura 1) y la posición de cada uno fue determinada aleatoriamente. Ya llena el horno se procedió a carbonizar las muestras. El proceso de carbonización duraba entre 48 y 72 horas. Una vez terminada la carbonización se deja completamente sellado el horno por 48 horas con el propósito de que el fuego del interior se extinga y las repeticiones se enfríen.

### 6.7.1 Manejo y traslado del producto de la carbonización

Terminada la carbonización se extrajeron los recipientes y en bolsas plásticas (para no alterar las características y contenido de humedad del carbón), se trasladó al laboratorio una muestra de aproximadamente 300 gr de cada una de las muestras de las especies evaluadas.



**Figura 1.** Distribución de los Recipientes que Contienen las Muestras Dentro de la Carbonera.

## **6.8 Análisis de laboratorio**

En laboratorio del Ministerio de Energía y Minas se realizaron una series de pruebas para determinar el porcentaje de Humedad, los contenido de Cenizas, Materias Volátiles, Carbono Fijo y el Poder Calorífico de todas las muestras, con metodologías basadas en la normas ASTM.

## **6.9 Ordenamiento de la información**

La información obtenida de los análisis del laboratorio se ordenó de acuerdo al tratamiento y repetición correspondiente, en una tabla de doble entrada.

## **6.10 Procesamiento de datos**

La información ya ordenada se trasladó a la hoja electrónica Quatro pro para facilitar la posterior utilización de la herramientas computarizadas S.A.S. (Statistical Analysis System) para el análisis estadístico, en Qpro se realizó el cálculo de los promedio de las repeticiones para cada una de las variables medidas, se estimó el rendimiento para cada repetición y se convirtió de BTU/lb a Kcal/kg los resultados de poder calorífico.

## **6.11 Análisis estadístico**

El análisis estadístico de los resultados obtenidos de la información ya procesada en Quatro pro se trasladó al programa S.A.S. (Statistical Analysis System) por sus siglas en inglés, en este

programa se realizó los siguientes análisis:

- 1ro. Se corrió una prueba de normalidad para los valores obtenidos en las cinco repeticiones para cada variable medida de las especies evaluadas.
- 2do. Se efectuó el Análisis Univariado de Varianza para cada variable de interés, con su respectiva prueba de Tukey (ver Apéndice).

El modelo del ANDEVA (Análisis de Varianza) es:

$$Y_{ij} = M + T_i + B_j + E_{ij}$$

Donde:

$Y_{ij}$	=	Variable respuesta
$M$	=	Efecto de la media
$T_i$	=	Efecto del $i$ ésimo tratamiento
$B_j$	=	Efecto de la $j$ ésimo bloque
$E_{ij}$	=	Error experimental

- 3ro. Se corrió el Análisis Multivariado Varianza (MANOVA) para determinar si existen o no diferencias significativas entre los tratamientos (especies).

El modelo lineal del MANOVA (Multivariate Analysis of Variance) es:

$$Y_{ij} = M + T_i + B_j + E_{ij}$$

Donde:

$$Y_{ij} = \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \end{Bmatrix} = \text{Vector de variable respuesta}$$

$$M = \begin{cases} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \end{cases} = \text{Efecto del Vector de Medias}$$

$$T_1 = \begin{cases} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \end{cases} = \text{Efecto del Vector de Tratamientos}$$

$$B_1 = \begin{cases} Y_6 \\ Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \end{cases} = \text{Efecto del Vector de Bloques}$$

$$E_0 = \begin{cases} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \end{cases} = \text{Vector de Errores Experimentales}$$

$$E_0 \sim NM(0, \Sigma) \text{iid} \quad (1)$$

4to. Por último, para confirmar los resultados de los anteriores análisis, se corrió la prueba de Freedman que es un Análisis no Paramétrico a las variables que determinan la calidad del carbón vegetal.

Inicialmente se establecieron rangos basados en las proporciones óptimas para las variables de calidad establecidas por el Servicio Forestal mexicano (cita 15). Se estratificaron en tres categorías las variables de Humedad, Cenizas, Materias Volátiles y

**Carbono Fijo.** Los rangos establecidos fueron 1 para los valores no satisfactorios, 2 para los valores satisfactorios (dentro del rango establecido por la cita 15) y 3 para los valores que superaron el rango establecido por la cita 15. El resultado de esta estratificación puede observarse en el apéndice.

A las variables que expresaron valores en más de un estrato se les corrió la prueba de Freedman que es un Análisis de Varianza no Paramétrico.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2 se encuentran tabulados los resultados que permiten concluir sobre el rendimiento (en peso base seca) y las variables que determinan la calidad (Humedad, Materias Volátiles, Carbono Fijo, Cenizas y Poder Calorífico) del carbón vegetal, así como los promedios de las repeticiones para cada una de las variables de las especies evaluadas (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maid, *Eucalyptus saligna* Sm., *Gmelina arborea* Roxb., *Casuarina cunninghamiana* Miq. y *Quercus peduncularis* Née).

**Cuadro 2.** Resumen de los resultado de Rendimiento y Calidad del Carbón Vegetal de las especies evaluadas (*Eucalyptus saligna* Sm., *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maid, *Gmelina arborea* Roxb., *Casuarina cunninghamiana* Miq. y *Quercus peduncularis* Née).

ESPECIE	REPETICION	PORCENTAJE RENDIMIENTO	PORCENTAJE HUMEDAD	PORCENTAJE MAT. VOLATIL.	PORCENTAJE CENIZAS	PORCENTAJE CARR. FDO	PODER CALORIFICO
							Kcal/Kg
EUCALYPTUS SALIGNA	1	33.15	4.06	43.49	2.45	50.09	7479.36
	2	29.55	3.26	43.27	1.78	49.49	7479.58
	3	36.66	2.10	43.15	1.30	51.49	7479.25
	4	32.72	1.57	43.79	1.62	53.69	7615.66
	5	30.85	2.03	44.46	1.35	52.16	7731.89
	PROMEDIO	32.59	3.00	44.03	1.66	51.36	7602.62
EUCALYPTUS GRANDIS	1	33.60	3.26	37.33	2.28	56.33	7341.83
	2	21.44	3.66	40.81	5.81	50.63	6909.97
	3	33.81	5.76	40.71	0.94	52.59	7572.69
	4	36.74	3.00	50.00	1.14	43.86	7667.63
	5	31.83	1.97	43.20	1.19	53.64	7762.12
	PROMEDIO	32.28	3.53	42.43	2.23	51.79	7274.83
GMELENA ARBOREA	1	38.81	3.73	40.33	2.91	53.40	7663.37
	2	36.71	4.01	38.97	2.10	53.83	7313.36
	3	38.96	2.83	42.33	2.34	52.63	7642.74
	4	34.28	2.58	40.89	2.79	53.66	7562.49
	5	38.46	1.96	41.31	2.77	53.76	7593.69
	PROMEDIO	35.49	2.98	40.72	2.44	53.66	7562.56
CASUARINA CUNNINGHAMIANA	1	27.33	4.08	44.85	3.22	47.83	7341.28
	2	26.40	3.96	43.00	3.63	49.31	7331.49
	3	36.41	1.94	50.56	1.96	48.52	7562.13
	4	33.17	2.43	50.78	3.66	43.14	7663.33
	5	28.13	3.00	42.01	3.36	51.48	7562.76
	PROMEDIO	30.30	3.08	46.24	3.01	47.86	7562.36
QUERCUS SP	1	29.42	3.89	36.29	3.66	56.36	7341.28
	2	30.55	4.08	38.28	3.96	53.49	7562.94
	3	30.15	2.90	51.96	4.69	48.33	7562.94
	4	30.79	2.88	47.98	5.16	42.96	6943.96
	5	32.28	3.87	49.12	5.30	41.63	6943.96
	PROMEDIO	30.66	3.67	44.73	4.42	47.19	7562.36



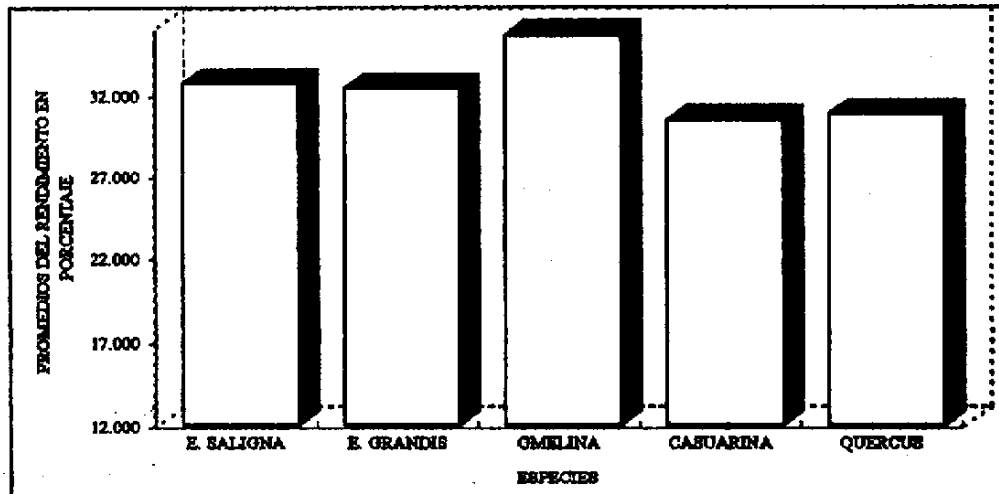
## 7.1 Rendimiento

Como se mencionó, en el Cuadro 2 se encuentran tabulados en la tercera columna los resultados de rendimiento para todas las repeticiones, de las especies evaluadas (Eucalyptus grandis W: Hill ex Maid, Eucalyptus saligna Sm., Gmelina arborea Roxb., Casuarina cunninghamiana Miq. y Quercus peduncularis Née) y sus valores promedios, los cuales muestran gran similitud en el comportamiento del rendimiento, como se puede observar en la Figura 2, se encuentran en el rango de 30.297% para Casuarina cunninghamiana Miq. y un 35.446 % para Gmelina arborea Roxb..

Los Análisis Estadísticos realizados, indican que para el rendimiento del carbón vegetal no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (especies). Es decir que estadísticamente el rendimiento el carbón vegetal producido a partir árboles jóvenes especies forestales de rápido crecimiento (Eucalyptus grandis W: Hill ex Maid, Eucalyptus saligna Sm., Gmelina arborea Roxb. y Casuarina cunninghamiana Miq.) son iguales entre si y también con respecto al encino (Quercus peduncularis Née). Los rendimientos en general son relativamente altos, comparados con los reportados en Ecuador del 34.40% (7), debido a que han quedado retenidas buena parte de las materias volátiles.

## 7.2 Calidad

Los resultado de las variables que determinan la calidad del carbón vegetal (Humedad, Cenizas, Materias Volátiles, Carbono Fijo y Poder Calorífico) producido a partir de árboles jóvenes de especies forestales de rápido crecimiento (Eucalyptus grandis W. Hill ex Maid, Eucalyptus saligna Sm., Gmelina arborea Roxb. y Casuarina cunninghamiana Miq.) y encino (Quercus peduncularis Née), se discuten a continuación.

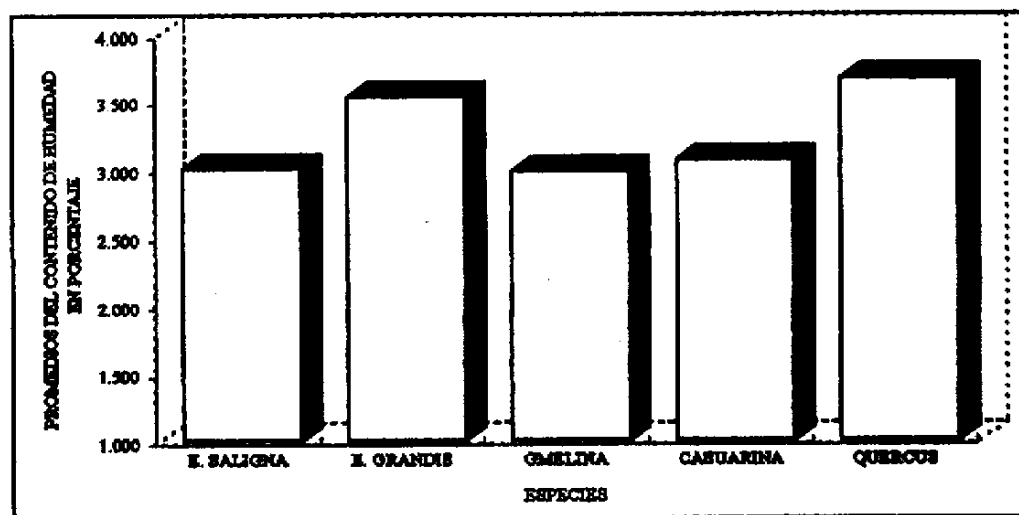


**Figura 2.** Rendimiento promedio de las especies evaluadas (*Eucalyptus saligna* Sm., *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maid, *Gmelina arborea* Roxb., *Casuarina cunninghamiana* Miq. y *Quercus peduncularis* Née) expresado en porcentaje.

### 7.2.1 Contenido de Humedad

Los valores promedio del contenido de Humedad de cada especie son muy similares como se puede observar en la Figura 3. Los valores promedio del contenido de Humedad se encuentran en el rango de 2.98% para *Gmelina arborea* Roxb. y 3.66 % para *Quercus peduncularis* Née.

Los valores en general son aceptables, en relación a las proporciones óptimas de los componentes químicos del carbón vegetal (referencia 15), los cuales establecen el rango del 2 al 4%. Esto se debe al bajo contenido de humedad de la madera carbonizada. El bajo contenido de humedad es positivo e influye de manera directa en el poder calorífico, pues al llevarse a cabo la carbonización un alto contenido de humedad implica que es necesario emplear parte del poder calorífico de la madera para evaporar la humedad.



**Figura 3.** Contenido de Humedad promedio de las especies evaluadas (*Eucalyptus saligna* Sm., *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maid, *Gmelina arborea* Roxb., *Casuarina cunninghamiana* Miq. y *Quercus peduncularis* Néé) expresado en porcentaje.

### 7.2.2 Contenido de Cenizas

Los promedios del contenido de Cenizas son similares entre cada especie como se puede observar en la Figura 4. Los valores promedio obtenidos se encuentran en el rango de 1.66% para *Eucalyptus saligna* Sm. y 4.42 % para *Quercus peduncularis* Néé.

Los valores en general son aceptables, con relación a las proporciones óptimas de los componentes químicos del carbón vegetal establecidos por el Servicio Forestal Mexicano (referencia 15), los cuales están en el rango del 1 al 4% a excepción de *Quercus peduncularis* Néé.

Hay dos aspectos importantes en el hecho de obtener un bajo contenido de cenizas; el primero, ya que las cenizas por ser una materia inerte no reacciona en la combustión por lo tanto no genera calor y por el otro lado es que los desechos y residuos al fin de la combustión serán muy escasos. Un alto contenido de cenizas puede dar una falsa idea de buen rendimiento.

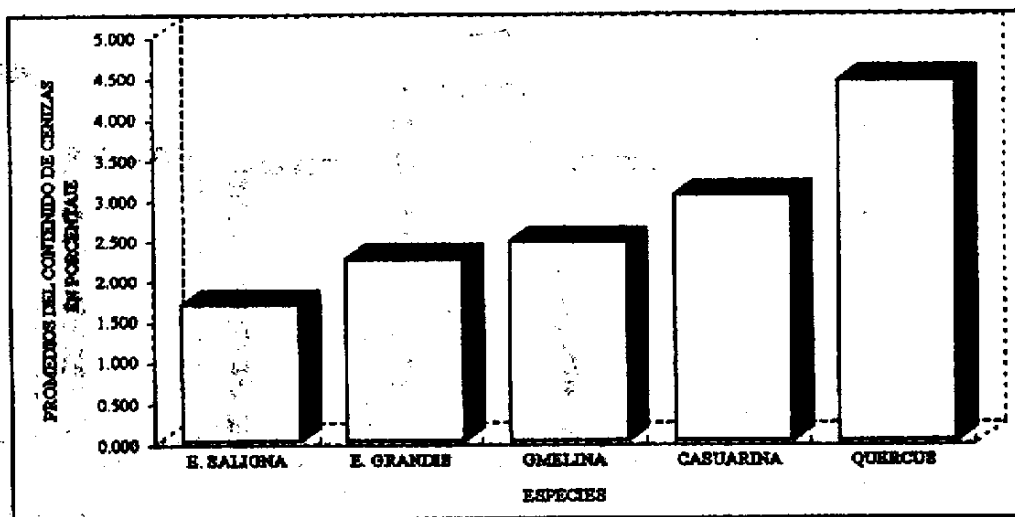


Figura 4. Contenido promedio de Cenizas de las especies evaluadas (*Eucalyptus saligna* Sm., *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maid., *Gmelina arborea* Roxb., *Casuarina cunninghamiana* Miq. y *Quercus peduncularis* Née) expresado en porcentaje.

### 7.2.3 Contenido de Materias Volátiles

Los promedios del contenido de Materias Volátiles son muy similares como puede observarse en la Figura 5. Los valores promedios del contenido de Materias Volátiles de las especies evaluadas se encuentran entre 40.78% para *Gmelina arborea* Roxb. y 46.24% para *Casuarina cunninghamiana* Miq.

Los valores en general para el contenido de Materias Volátiles son relativamente altos, en comparación a las proporciones óptimas de los componentes químicos del carbón vegetal establecidos por el Servicio Forestal Mexicano (referencia 15), los cuales deben estar del 18 al 23%. Según Resende Penedo (19) estos altos contenidos se debe a que el proceso de carbonización se llevó a cabo a temperaturas por debajo de los 500 ° C, esto es perjudicial desde el punto de vista

energético, pues inciden en la disminución del contenido de carbono fijo y con ello del poder calorífico del carbón vegetal.

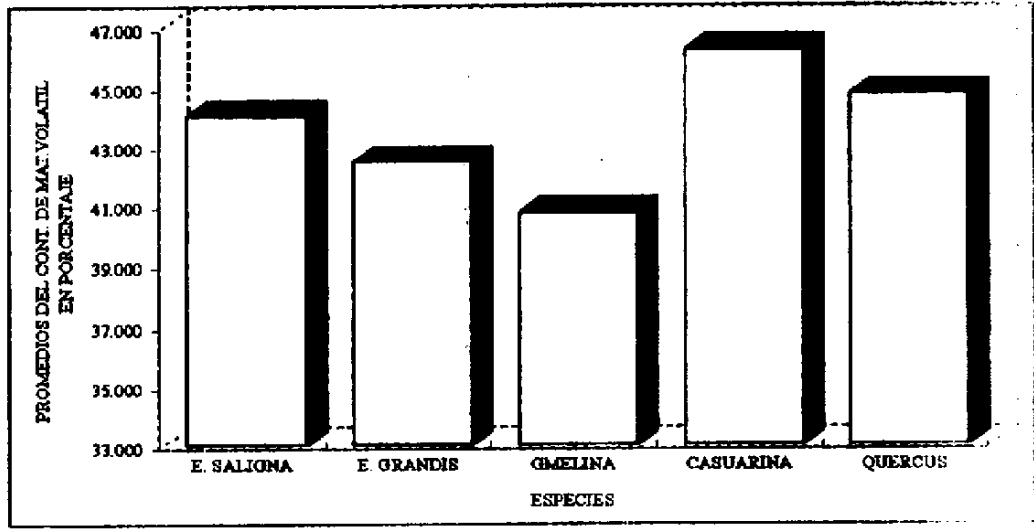
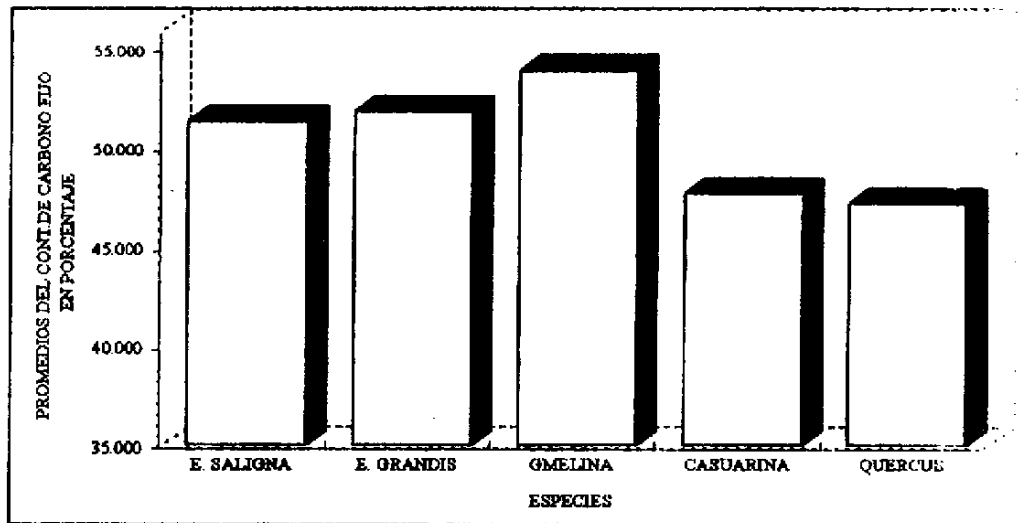


Figura 5. Contenido de Materias Volátiles promedio de las especies evaluadas (Eucalyptus saligna Sm., Eucalyptus grandis W. Hill ex Mald, Gmelina arborea Roxb., Casuarina cunninghamiana Miq. y Quercus peduncularis Née) expresado en %.

7.2.4 Contenido de Carbono Fijo

Los promedios del contenido de Carbono Fijo son muy similares como puede observarse en la Figura 6. Los valores de los promedios del contenido de Carbono Fijo de las especies evaluadas se encuentran entre 53.86% para Gmelina arborea Roxb. y 47.192% para Quercus peduncularis Née.

Los valores para el contenido de Carbono Fijo son relativamente bajos, en comparación a las proporciones óptimas de los componentes químicos del carbón vegetal establecidos por el Servicio Forestal Mexicano (referencia 15), los cuales deben estar en el rango de 74 a 81%. Este comportamiento está directamente relacionado con el alto contenido de materias volátiles.



**Figura 6.** Contenido de Carbono Fijo promedio de las especies evaluadas (Eucalyptus saligna Sm., Eucalyptus grandis W. Hill ex Maid, Gmelina arborea Roxb., Casuarina cunninghamiana Miq. y Quercus peduncularis Née) expresado en porcentaje.

### 7.2.5 Poder Calorífico

Los promedios del Poder Calorífico son muy similares como puede observarse en la Figura 7. Los valores promedio del Poder Calorífico de las especies evaluadas se encuentran entre 7,602.0185 Kcal/kg para Eucalyptus Saligna Sm. y 7,032.519 Kcal/kg para Quercus peduncularis Née.

Según los análisis estadísticos realizados no existen para esta variable diferencias significativas, debido a la similitud en el comportamiento de esta variable en los distintos tratamientos y repeticiones.

Esta variable está determinada principalmente por el contenido de Carbono Fijo, al ser este contenido bajo se estima que de igual forma se califica el Poder Calorífico.

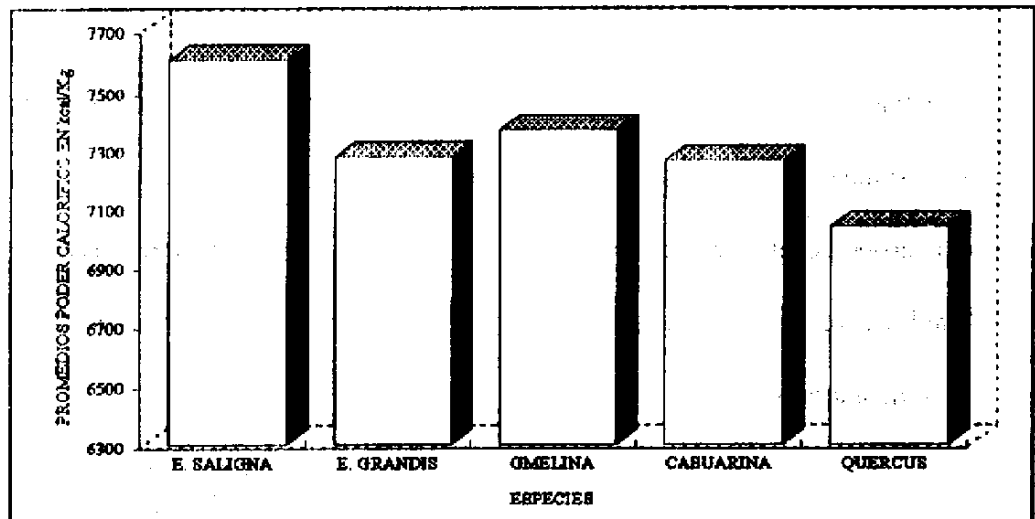


Figura 7. Poder Calorífico promedio de las especies evaluadas (Eucalyptus saligna Sm, Eucalyptus grandis W. Hill ex Maid, Gmelina arborea Roxb., Casuarina cunninghamiana Miq. y Quercus peduncularis Née).

El rendimiento del carbón para todas las especies evaluadas se considera alto en relación con referencias bibliográficas. Como se puede apreciar en el cuadro resumen los valores se encuentran entre un rango muy pequeño por lo que no se establecieron diferencias significativas con ninguno de los análisis efectuados a esta variable.

En cuanto a las variables de calidad, se encuentra que de igual manera que para el rendimiento los valores para las distintas repeticiones y tratamientos son muy similares, lo que no permite establecer diferencias estadísticamente diferencias significativas.

### 7.3. Análisis Estadísticos

Tanto el Análisis Univariado de Varianza Análisis (ANDEVA), el Análisis Multivariado de Varianza (MANOVA) como se puede ver en la salida de S.A.S. que se presenta a continuación (específicamente para el estadístico de Lambda de Wilks' cuyo valor de  $Pr > F$  es 0.1059, el cual es suficiente para aceptar en la presente investigación la hipótesis de igualdad entre tratamientos), y el

Análisis no Paramétrico (ver anexo para más detalle de los tres análisis), indican que no existen diferencias estadísticamente significativas para las variables que determinan el rendimiento y la calidad del carbón vegetal producido a partir de las cinco especies evaluada (Eucalyptus grandis W. Hill ex Maid, Eucalyptus saligna Sm., Gmelina arborea Roxb. , Casuarina cunninghamiana Miq. y Quercus peduncularis Née)

Manova Test Criteria and F Approximations for  
The Hypothesis of on Overall ESPECIES Effect  
H = Type III SS&CP Matrix For ESPECIE E = Error SS&CP Matrix  
S=4 M=0.5 N=4.5

Statistic	Value	F	Num DF	Den DF	Pr > F
Wilks' Lambda	0.09832158	1.5574	24	39.58446	0.1059
Pillai's Trace	1.60851304	1.5694	24	56	0.0840
Hotellin-Lauley Trace	3.64857021	1.4442	24	38	0.1521
Roy's Gretest Root	2.00279513	4.6732	6	14	0.0082

Note: F Statistic for Roy's Greatest Root is an upper bound.

Dado que los resultados del análisis estadístico no expresan diferencias significativas, tendrá que ser otros factores, los que las determinen; tal como un análisis de costos de producción el cual indicara desde la perspectiva económica cual de las especie es la más adecuada para producir carbón vegetal.

Los resultados de rendimiento y las variables que determinan la calidad están relacionados entre sí, como se puede observar en la relación que existen entre el alto contenido de materias volátiles y el rendimiento, ya que las materias volátiles incrementan el rendimiento del carbón vegetal y al mismo tiempo por ser una sustancia que al reaccionar en la combustión no aporta poder calorífico y genera humo deprecia la calidad del carbón vegetal.



## 8. CONCLUSIONES

- 8.1 Estadísticamente no existen diferencias significativas en cuanto al rendimiento del carbón vegetal producido a partir de especies forestales de rápido crecimiento (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maid, *Eucalyptus saligna* Sm., *Gmelina arborea* Roxb. y *Casuarina cunninghamiana* Miq.) entre sí, ni en comparación con los resultados del encino (*Quercus peduncularis* Née).
- 8.2 Estadísticamente no existen diferencias significativas para ninguna de las cinco (5) variables que determinan la calidad del carbón vegetal (Humedad, Cenizas, Carbono Fijo y Poder Calorífico) producido a partir de las especies forestales de rápido crecimiento (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maid, *Eucalyptus saligna* Sm., *Gmelina arborea* Roxb. y *Casuarina cunninghamiana* Miq.) entre sí, ni en comparación con los resultados del encino (*Quercus peduncularis* Née).
- 8.3 Con respecto al rendimiento y la calidad del carbón vegetal producido de las cinco (5) especies evaluadas (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maid, *Eucalyptus saligna* Sm., *Gmelina arborea* Roxb., *Casuarina cunninghamiana* Miq. y *Quercus peduncularis* Née), estadísticamente es indistinto la utilización de cualquiera de ellas, para la producción de carbón vegetal.
- 8.4 Se acepta la hipótesis de igualdad estadística del rendimiento y la calidad del carbón vegetal producido a partir de especies forestales de rápido crecimiento (*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maid, *Eucalyptus saligna* Sm., *Gmelina arborea* Roxb. y *Casuarina cunninghamiana* Miq.) y el encino (*Quercus peduncularis* Née).

## 9. RECOMENDACIONES

- 9.1 De acuerdo con los resultados de la presente investigación, pueden utilizarse cualquiera de las especies forestales de rápido crecimiento (Eucalyptus grandis W. Hill ex Maid, Eucalyptus saligna Sm., Gmelina arborea Roxb. y Casuarina cunninghamiana Miq.) o encino (Quercus peduncularis Née) para la producción de carbón vegetal
- 9.2 Realizar un estudio con las mismas especies (Eucalyptus grandis W. Hill ex Maid, Eucalyptus saligna Sm., Gmelina arborea Roxb., Casuarina cunninghamiana Miq. y Quercus peduncularis Née) que incluya el análisis de los costos de producción del carbón vegetal, para establecer desde esta perspectiva cual es la especie más conveniente.
- 9.3 Si se desea obtener carbón vegetal de mejor calidad con las especies evaluadas (Eucalyptus grandis W. Hill ex Maid, Eucalyptus saligna Sm., Gmelina arborea Roxb., Casuarina cunninghamiana Miq. y Quercus peduncularis Née), se recomienda efectuar pruebas en otros tipos de hornos que permitan alcanzar mejores condiciones de carbonización.
- 9.4 Validar otras especies forestales introducidas de rápido crecimiento que han demostrado buena adaptación en nuestro medio como fuentes para producir carbón vegetal.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

1. ALVAREZ CAJAS, V. Aplicaciones estadísticas con S.A.S. Guatemala. 74 p.

Sin publicar

2. CARRILLO, A. 1983. El carbón vegetal como fuente de energía renovable en Guatemala. 7 Días en la USAC, Guate. no. 10:12.

3. CARVAO VEGETAL; destilacao, propiedad, carvoejamento e controle de qualidade. 1982. Publicacoes Técnicas (Br.) 1(6): 1-173.

4. CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA (C.R.). 1986. Silvicultura de especies promisorias para la producción de leña en América Central. Turrialba. C. R. Informe Técnico no. 86. 220 p.

5. CURSO SOBRE CARBON VEGETAL PARA CENTRO AMERICA (1, 1983, Guatemala.). Guatemala, Ministerio de Energía y Minas. v.1, 286 p.

6. ESCOTO, M.; GRAHAM, M. 1981. Producción y características del carbón vegetal. In Congreso Nacional de Ingeniería de la Madera. (2, 1981, Costa Rica). Memorias. Costa Rica, Instituto Tecnológico. p 384-422.

7. FAO (ITALIA). 1983. Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Roma. 54 p.

8. FERREIRA ROJAS, O. 1990. Manual de inventarios forestales. Siguatepeque, Honduras, Escuela Nacional de Ciencias Forestales. 175 p.

9. GUATEMALA, INSTITUTO NACIONAL DE SISMOLOGIA Y VULCANOLOGIA, METEOROLOGÍA E HIDROLOGIA. 1996. Tarjeta de control de la estación meteorológica INSIVUMEH. Departamento de Planificación. Hoja del Humedad Relativa en Porcentaje de los Últimos Once Años.

Sin publicar.

10. HOJA DE LA TEMPERATURA MEDIA EN GRADOS CENTIGRAOS DE LOS ULTIMOS ONCE AÑOS.

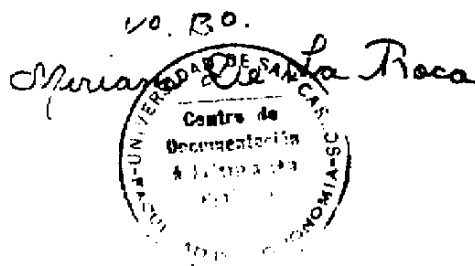
Sin publicar.

11. HOJA DEL TOTAL ANUAL Y MENSUAL DE PRECIPITACION EN mm DE LOS ULTIMOS ONCE AÑOS.

Sin publicar.

12. INSTITUTO NACIONAL FORESTAL. 1983. Mapa de zonas de vida a nivel de

- 61
- reconocimiento. Esc. 1:600,000.
13. INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA INDUSTRIAL. 1987. (Guate.). Hornos para carbón vegetal. s.l. 61 p.
  14. LEYTON, J.I. 1986. Bases para la planificación del desarrollo forestal en la región oriental de Guatemala. Guatemala, FAO. 30 p.
  15. MEXICO. SERVICIO FORESTAL. 1964. Carbón de leña; producción, venta y uso. México, Herrero. 167. P.
  16. OHOLS DEL CID R. 1975. Mapa climatológico preliminar de Guatemala. Según el Sistema Thorthwaite. Guatemala, Instituto Geográfico Nacional. Esc. 1:1,000,000. Color.
  17. OFICINA INTERNACIONAL DEL TRABAJO (Suiza). 1975. Fabricación artesanal de carbón vegetal para la pequeña empresa. Ginebra. 26 p.
  18. RESENDE PENEDO, W. 1980. Uso de madeira para fines energéticos. Belo Horizonte, Brasil. Fundacao Centro Tecnológico de Minas Gerais. Serie de Publicacoes Técnica, v. 1, no.6. 156 p.
  19. \_\_\_\_\_. 1982. Producao e utilizacao de carvao vegetal. 1982. Belo Horizonte. Brasil, Fundacao Centro Tecnológico de Minas Gerais. Serie de Publicacoes Técnicas, v. 1, no. 8. 398 p.
  20. ROOS, E.; ROOS, U. 1979. Survey of simple kiln systems and recomendations for the selection of kiln. German, Appropriate Technology Exchange. 31 p.
  21. YOUNG, K.R. 1980. Guía de árboles para viveros forestales. Guatemala, INAFOR. Informe no. 1. 191 p.



**11. APENDICE**

## 11. APENDICE

### 11.1 METODOLOGIA PARA DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO

**Equipo:** Bomba calorimétrica

**Reactivos:** Agua destilada

Indicador naranja de metilo

Carbonato de sodio

Descripción del procedimiento para la determinación del calor de combustión por el método de la bomba calorimétrica según la norma ASTM D-240:

- 1) Pesar de 0.9 a 1.0 gr. de muestra en un crisol
- 2) Colocar 1 ml de agua destilada en la bomba calorimétrica
- 3) Colocar 2 lt de agua destilada en el baño de la bomba calorimétrica
- 4) En los electrodos de la bomba calorimétrica colocar un alambre de 10 cm como puente para la ignición
- 5) Se coloca el crisol dentro de la bomba calorimétrica y se le aplican 30 ATM (atmósferas) de presión, teniendo el cuidado de no sobrecargar (no sobrepasar las 30 ATM) la bomba
- 6) Introducir la bomba calorimétrica en el baño de la misma y colocar los electrodos
- 7) Chequear que no existan fugas, si se detecta alguna fuga la prueba se descarta
- 8) Se chequea que la  $T^{\circ}$  inicial del baño sea mayor de  $19.5^{\circ} C$
- 9) Se agita el baño durante 5 min para lograr una  $T^{\circ}$  constante, luego se registra la  $T^{\circ}$  cada 5 min, al cumplirse los 5 min se produce la ignición, posteriormente se registrará la  $T^{\circ}$  cada 15 seg hasta el 6to minuto, seguidamente cada minuto hasta que se alcance una  $T^{\circ}$  constante la cual debe mantenerse por 5 minutos
- 10) Liberar lentamente la presión de la bomba calorimétrica
- 11) Chequear que la combustión de la muestra fue completa

- 12) Lavar los residuos de la muestra con agua destilada e indicador naranja de metilo
- 13) Titular para neutralizar los residuos con una solución de carbonato de sodio y anotar los ml gastados
- 14) Medir la longitud del alambre no combustionado
- 15) Corregir las lecturas del termómetro
- 16) Determinar el contenido de azufre. Utilizando los residuos se determina el porcentaje de azufre, si este excede el 1.0% se utiliza el procedimiento que se indica en el método ASTM 129

Cálculos:

Usando los datos obtenidos en el procedimiento, se realiza el siguiente cálculo:

$$T = T_c - T_a - r_1 (b - a) - r_2 (c - b)$$

Donde:

T = gradientes de T ° C corregida

a = tiempo de ignición

b = tiempo en el que T ° C alcanza el 60 % del gradiente

c = tiempo en el que se alcanza la mayor T °

T<sub>a</sub> = T ° C en el tiempo a

T<sub>c</sub> = T ° C en el tiempo c

r<sub>1</sub> = es una corrección de temperaturas durante los primeros 5 min previo a la ignición

r<sub>2</sub> = es una corrección de las temperaturas después del tiempo c

## 11.2 METODOLOGIA PARA DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD

Equipo: 3 cápsulas de porcelana

Balanza analítica

Horno de desecación

### Desecador

A continuación se describe el método para la determinación del porcentaje de humedad en carbon según la norma ASTM D-3173.

- 1) Secar a 105 ° C las cápsulas de porcelana completamente limpias por una hora
- 2) Colocar las cápsulas en el desecador por 15 min
- 3) Pesar las cápsulas (tara)
- 4) Determinación de humedad:
  - A. pesar 1 gr de muestra por cápsula de porcelana
  - B. secar en el horno a 105 a 110 ° C durante una hora
  - C. Colocar las cápsulas posteriormente en el desecador por 15 min
  - D. pesar la muestra

Cálculos:

$$\text{Porcentaje de H} = \frac{(P_i - P_f)}{P_m} * 100$$

Donde:

Porcentaje de H = % de humedad

P<sub>i</sub> = Peso inicial

P<sub>f</sub> = Peso final

P<sub>m</sub> = Peso muestra

### 11.3 METODOLOGIA PARA DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE CENIZAS

Equipo: 3 cápsulas de porcelana

Balanza analítica

Horno de desecación

Desecador



A continuación se describe el método para la determinación del porcentaje de cenizas en carbón según la norma ASTM D-3174.

- 1) Pesar 1 gr de muestra en una cápsula de porcelana
- 2) Colocar en el horno a 500 ° C durante 1 hora
- 3) Aumentar la temperatura del horno a 800 ° C durante 1 hora, hasta llevar a peso constante
- 4) Colocar en el desecador durante 20 minutos
- 5) Pesar la muestra

Cálculos:

$$\text{Porcentaje de C} = \frac{(P_i - P_f)}{P_m} * 100$$

Donde:

Porcentaje de C = % de cenizas

P<sub>i</sub> = Peso inicial

P<sub>f</sub> = Peso final

P<sub>m</sub> = Peso muestra

#### 11.4 METODOLOGIA PARA DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE MATERIA VOLÁTIL

Equipo: 3 cápsulas de porcelana

Balanza analítica

Horno de desecación

Desecador

A continuación se describe el método para la determinación del porcentaje de materia volátil en carbón según la norma ASTM D-3175.

- 1) Pesar 1 gr de muestra en una cápsula de porcelana

- 2) Colocar en el horno a 925 ° C durante 1 hora
- 3) Introducir la muestra lo más rápido posible para evitar pérdida de calor. Dejar de 1 a 3 minutos hasta que el horno se estabilice
- 4) Tomar el tiempo durante 7 minutos exactos
- 5) Poner en el desecador durante 20 minutos
- 6) Pesar la muestra

**Cálculos:**

$$\text{Porcentaje de MV} = \frac{(P_i - P_f)}{P_m} * 100$$

**Donde:**

**Porcentaje de MV = % de materia volátil**

**P<sub>i</sub> = Peso inicial**

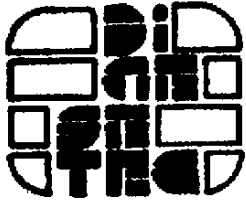
**P<sub>f</sub> = Peso final**

**P<sub>m</sub> = Peso muestra**

## **11.5 METODOLOGIA PARA DETERMINACIÓN DE CARBÓN FIJO**

El procedimiento para la determinación de la materia volátil se efectúa según el método de la norma ASTM D-3172 el cual se resumen en el siguiente cálculo.

$$\text{\% de Carbono Fijo} = 100\% - (\text{\% de Humedad} + \text{\% de Cenizas} + \text{\% de Materia Volátil})$$



DIRECCION GENERAL  
DE SERVICIOS TECNICOS  
MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS  
Avenida 17, 29-78, Zona 11  
Tel.: 780678 - 82  
Guatemala, C. A.

LAB-MIN-513-96  
NUM. ORDEN No. L-207-96  
GUATEMALA, 29-08-96

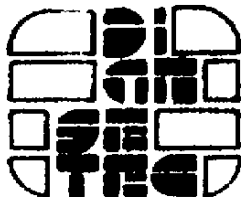
MUESTRAS: 13 Carbones Vegetales  
PRESENTADAS POR: Dirección de Planificación  
Departamento de Desarrollo  
PROVENIENCIA: Proyecto, Investigación del Rendimiento  
y Calidad del Carbón Vegetal  
PRECIO DE ANALISIS: Q 2925.00  
ANALISTAS: López, Cifuentes, de León, Par, Mijangos

MUESTRA	Humedad % peso	Materia Volátil % peso	Cenizas % peso	Carbón Fijo % peso	Poder Calórico BTU/lb
PD-1	3.48	38.72	4.80	53.00	11902
PE-2	3.75	35.84	1.61	58.80	13347
PM-3	3.49	35.75	1.23	59.53	13303
SI-4	4.06	43.49	2.45	50.00	13448
S2-5	5.26	43.27	1.78	49.69	13449
G1-6	3.26	37.53	2.38	56.83	13186
G2-7	3.66	40.81	5.51	50.02	12531
ML-8	3.73	40.53	2.31	53.43	13331
M2-9	4.01	38.07	2.10	55.82	13529
C1-10	4.08	44.85	3.22	47.85	13023
C2-11	3.96	43.00	3.53	49.51	13198
E1-12	3.69	36.29	3.06	56.96	12987
E2-13	4.09	38.28	3.98	53.65	12799

Ing. Julio Villacanda  
SECCION DE HIDROCARBUROS

Vo.Bo. Ing. Mayra Villacanda  
JEFE DEPTO. LABORATORIOS

Ing. Zaques Par  
SECCION DE MINERALES



DIRECCIÓN GENERAL  
DE SERVICIOS TÉCNICOS  
MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS

DIAGONAL 17. 29-78. ZONA II  
TELS: 760679-82  
GUATEMALA, C. A.

NUM. LAB-PET-440-996

ORDEN No. L-197-96  
GUATEMALA, 23-07-96

MUESTRAS: 8 Aserrines  
PRESENTADAS POR: Dirección de Planificación y Desarrollo  
Departamento de Desarrollo  
INSPECTOR Oscar Hernández  
PROCEDENTE DE: Proyecto Parque Demostrativo El Faro  
FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 15-07-96  
FECHA DE ANALISIS: 19-07-96  
PRECIO DE ANALISIS: Q 320.00  
ANALISTA: Oscar de León

RESULTADOS

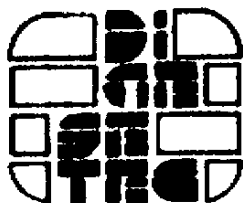
MUESTRA	HUMEDAD % Peso
EG	14.16
ES	15.28
C	13.93
M	12.91
PM	11.62
PD	12.79
PE	12.46
Q	13.19

  
Vo.Bo. Ing. Mayra Villatoro  
JEFE DEPTO. LABORATORIOS



  
Ing. J. Villacinda  
SECCION DE HIDROCARBUROS





DIRECCION GENERAL  
DE SERVICIOS TECNICOS  
MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS  
Diagonal 17, 29-78, Zona 11  
Tels.: 476-0880 / 82, 477-0901, 477-0903  
477-0382, Fax: 476-3175, 476-2044  
Guatemala, C. A.

NUM. LAI-PET-017-97  
ORDEN No. L-302-96  
GUATEMALA, 27-01-97

MUESTRAS: 15 Carbones

PRESENTADAS POR: Dirección de Planificación y Desarrollo Energético

PROCEDENTE DE: Departamento de Desarrollo. Proyecto Carbón Vegetal

TECNICO RESPONSABLE: Oscar Hernandez

FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 09-12-96 al 09-12-96

FECHA DE ANALISIS: 24-01-97

PRECIO DE ANALISIS: Q 3375.00

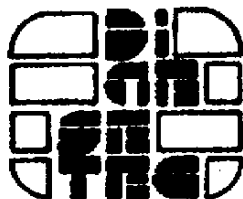
ANALISTAS: Cifuentes, Posadas y de León

### RESULTADOS

MUESTRAS	HUMEDAD % peso	CENIZAS % peso	MATERIA VOLATIL % peso	CARBON FIJO % peso	CALOR DE COMBUSTION BTU/lb
S1	2.10	1.10	45.15	51.65	13464
S2	1.57	1.62	43.79	53.02	14066
S3	2.03	1.35	44.46	52.16	13998
G1	5.76	0.94	40.71	52.59	13272
G2	3.00	1.14	50.00	45.86	12615
G3	1.97	1.19	43.20	53.64	13876
M1	2.62	2.24	42.53	52.61	12680
M2	2.58	2.79	40.95	53.68	13243
M3	1.96	2.77	41.51	53.76	13517
C1	1.84	1.08	50.56	46.52	13264
C2	2.42	3.66	50.78	43.14	12781
C3	3.00	3.58	42.01	51.41	13112
E1	2.80	4.69	51.96	40.55	12927
E2	3.88	5.16	47.98	42.98	12450
E3	3.87	5.20	49.12	41.82	12136

Ing. *[Signature]* Villacinda  
SECCION DE HIDROCARBUROS

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS



**DIRECCION GENERAL  
DE SERVICIOS TECNICOS**  
MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS  
Diagonal 17, 29-78, Zona 11  
Tels. 476-0880 / 82, 477-0901, 477-0903  
477-0382, Fax: 476-3175, 478-2044  
Guatemala, C. A.

NUM. \_\_\_\_\_

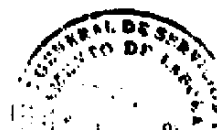
LAB-PET-661-96  
ORDEN No. L-293-96  
GUATEMALA, 16-12-96

**MUESTRAS: 3 Aserrines**  
**PRESENTADAS POR:** Dirección de Planificación y Desarrollo Energético  
**PROCEDENTES DE:** Departamento de Desarrollo. Proyecto Carbón Vegetal  
**FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA:** 27-11-96  
**FECHA DE ANALISIS:** 11-12-96  
**PRECIO DE ANALISIS:** Q 600.00  
**ANALISTA:** Posadas, de León, López y Cifuentes

### RESULTADOS

MUESTRAS	HUMEDAD % Peso ASTM D 3302
G1	11,28
G2	11,21
G3	11,87
M1	12,49
M2	10,53
M3	12,18
S1	13,36
S2	8,78
S3	10,21
E1	10,87
E2	10,24
E3	9,52
C1	10,61
C2	10,39
C3	8,28

Tina Posadas de León



SAS  
MIVARIATE PROCEDURE

Variable=PREM

Moments

N	25	Sum Wgts	25
Mean	32.25386	Sum	806.349
Std Dev	4.244011	Variance	18.01183
Skewness	-0.38208	Kurtosis	0.354882
USS	28440.23	CS	432.2782
CV	13.15811	Std Mean	0.848802
T:Mean=0	37.88838	Prob>T:	0.0001
Sgn Rank	182.5	Prob>S:	0.0001
Sum > 0	25		
W:Normal	0.887423	Prob<W	0.6888

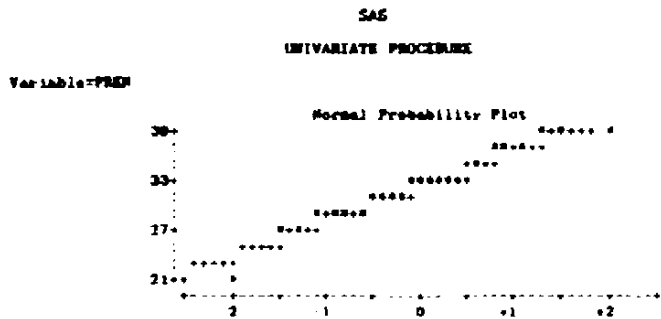
Quantiles(Def=5)

100% Max	38.876	98%	38.876
75% Q3	34.279	95%	38.81
50% Med	32.722	90%	38.742
25% Q1	29.555	10%	27.362
0% Min	21.436	5%	28.387
		1%	21.436
Range	17.44		
Q3-Q1	4.724		
Mode	21.436		

Extremes

Lowest	Obs	Highest	Obs
21.436	21	38.867	13
28.387	22	38.707	7
27.352	21	38.742	4
28.148	25	38.81	8
28.457	10	38.876	8

Stem	Leaf	#	Boxplot
38	780	3	.
36	477	3	.
34	3	1	-----
32	3712888	7	-----
30	2888	4	-----
28	1556	4	-----
26	44	2	.
24			.
22			.
20	4	1	0



SAS  
MIVARIATE PROCEDURE

Variable=MURMEDAD

Moments

N	25	Sum Wgts	25
Mean	3.248	Sum	81.2
Std Dev	1.073002	Variance	1.151333
Skewness	0.402365	Kurtosis	-0.13508
USS	291.5884	CS	27.632
CV	33.03678	Std Mean	0.2148
T:Mean=0	15.13811	Prob>T:	0.0001
Sgn Rank	182.5	Prob>S:	0.0001
Sum > 0	25		
W:Normal	0.844243	Prob<W	0.1948

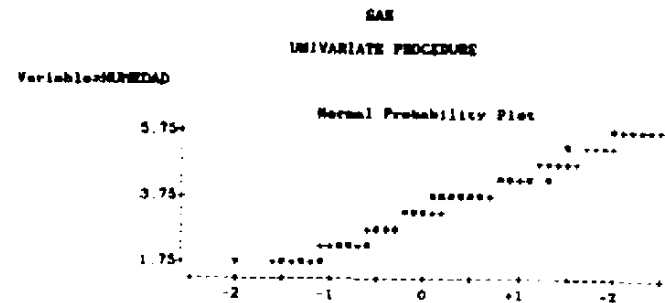
Quantiles(Def=5)

100% Max	5.78	98%	5.78
75% Q3	3.88	95%	5.26
50% Med	3.28	90%	4.08
25% Q1	2.42	10%	1.98
0% Min	1.67	5%	1.84
		1%	1.57
Range	4.11		
Q3-Q1	1.54		
Mode	3		

Extremes

Lowest	Obs	Highest	Obs
1.57	14	4.08	11
1.84	23	4.08	21
1.98	10	4.08	17
1.87	3	5.26	12
2.02	15	5.78	3

Stem	Leaf	#	Boxplot
5	8	1	.
5	3	1	.
4			.
4	00111	5	-----
3	77788	5	-----
3	003	3	-----
2	888	3	-----
2	90014	5	-----
1	88	2	.



SAS  
 BIVARIATE PROCEDURE  
 Variable=VOLATIL

Moments

N	25	Sum Mean	25
Mean	43.6332	Sum	1090.83
Std Dev	4.357185	Variance	18.98504
Skewness	0.388851	Kurtosis	-0.58087
OSB	4062.05	OSB	455.8415
CV	7.98584	Std Mean	0.871437
T:Mean=0	10.9704	Prob> T	0.0001
Sum Rank	182.5	Prob> S	0.0001
Pos = 0	25		
N:Normal	0.947648	Prob<W	0.1360

Quantiles(Def=5)

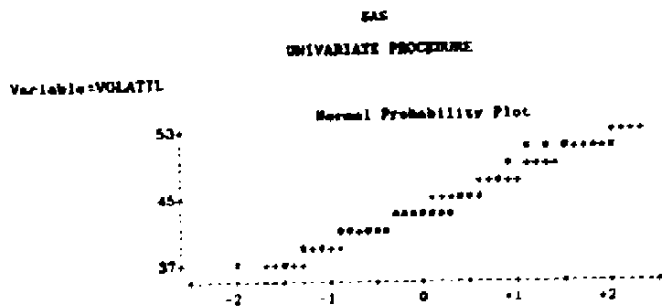
100% Max	51.86	90%	51.86
75% Q3	46.18	85%	50.78
50% Med	43.2	80%	50.56
25% Q1	40.81	10%	38.97
0% Min	38.29	5%	37.83
		1%	36.29
Range	15.87		
Q3-Q1	4.34		
Mode	38.29		

Extremes

Lowest	Obs	Highest	Obs
36.29	18	49.12	20
37.83	11	50	4
38.07	7	50.56	23
38.29	17	50.78	24
40.82	8	51.86	18

Stem Leaf

Stem	Leaf	n	Boxplot
42	0	1	0
40	0 6 6	3	:
48	0 1	2	:
48			:
44	8 4 2	3	-----
42	0 5 0 2 3 5 8	7	-----
40	8 7 8 0 5	6	-----
38	1 3	2	:
38	3 5	2	:



SAS  
 UNIVARIATE PROCEDURE  
 Variable=CENIZAS

Moments

N	25	Sum Mean	25
Mean	2.7532	Sum	68.83
Std Dev	1.388088	Variance	1.928768
Skewness	0.836142	Kurtosis	-0.98825
OSB	238.7487	OSB	68.24384
CV	60.41727	Std Mean	0.277818
T:Mean=0	8.817238	Prob> T	0.0001
Sum Rank	182.5	Prob> S	0.0001
Pos = 0	25		
N:Normal	0.831308	Prob<W	0.0888

Quantiles(Def=5)

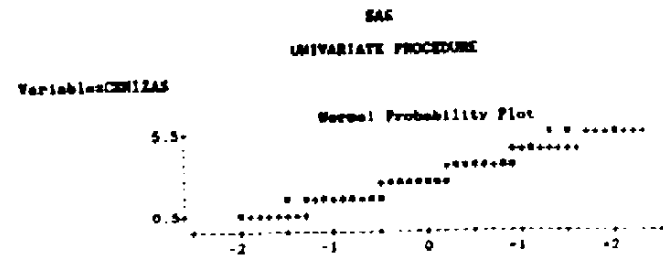
100% Max	6.51	90%	5.51
75% Q3	3.58	85%	5.2
50% Med	2.45	80%	5.18
25% Q1	1.82	10%	1.1
0% Min	0.84	5%	1.08
		1%	0.84
Range	4.57		
Q3-Q1	1.86		
Mode	0.84		

Extremes

Lowest	Obs	Highest	Obs
0.84	31	3.86	17
1.08	23	4.88	18
1.1	13	5.18	19
1.34	4	5.2	20
1.38	5	5.51	21

Stem Leaf

Stem	Leaf	n	Boxplot
6	2 2 5	3	:
4	0 7	2	:
3	1 2 8 0 7	6	-----
2	1 2 3 4 4 8 8	7	-----
1	1 1 1 2 4 8 8	7	-----
0	8	1	:





SAS  
UNIVARIATE PROCEDURE

Variable=FIJO

Statistics

N	25	Sum Mpts	25
Mean	50.368	Sum	1258.15
Std Dev	4.611633	Variance	21.26716
Skewness	-0.72376	Kurtosis	-0.3145
USS	63828.78	CS	510.4118
CV	9.156242	Std Mean	0.922327
T-Statistic	54.80734	Prob>T	0.0001
Sgn Rank	163.5	Prob>S	0.0001
Sum = 0	25		
W:Normal	0.921428	Prob<W	0.0670

Quantiles(Def=5)

100% Max	54.86	90%	54.86
75% Q3	53.84	85%	54.83
50% Med	51.86	80%	55.82
25% Q1	47.86	10%	42.86
0% Min	40.55	5%	41.82
Range	14.41	1%	40.55
Q3-Q1	5.78		
Mode	40.55		

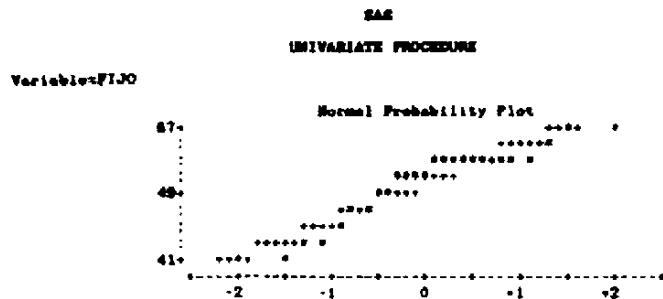
Extremes

Lowest	Obs	Highest	Obs
40.55	16	53.86	9
41.82	20	53.78	10
42.86	19	55.82	7
43.14	24	56.83	1
45.86	4	56.96	15

Stem Leaf

54 90	2	
54 8	1	
52 248044678	9	-----
50 0048	4	-----
48 57	2	-----
46 56	2	-----
44 9	1	
42 01	2	
40 88	2	

-----



SAS  
UNIVARIATE PROCEDURE

Variable=EX

Statistics

N	25	Sum Mpts	25
Mean	7207.758	Sum	182694
Std Dev	285.3027	Variance	79385.52
Skewness	-0.64914	Kurtosis	-0.14514
USS	1.328829	CS	1889253
CV	3.959225	Std Mean	53.86064
T-Statistic	137.7248	Prob>T	0.0001
Sgn Rank	162.5	Prob>S	0.0001
Sum = 0	25		
W:Normal	0.982366	Prob<W	0.8208

Quantiles(Def=5)

100% Max	7813.863	90%	7813.863
75% Q3	7479.82	85%	7775.888
50% Med	7331.488	80%	7708.118
25% Q1	7108.846	10%	6880.871
0% Min	6741.548	5%	6815.976
Range	1072.115	1%	6741.548
Q3-Q1	361.078		
Mode	6741.548		

Extremes

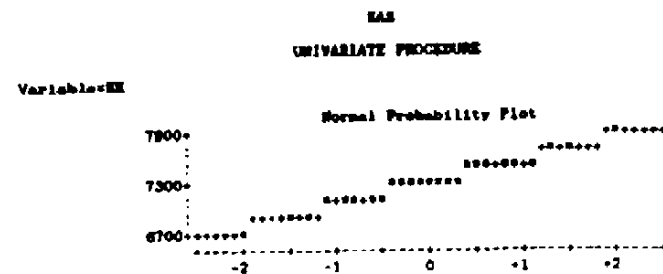
Lowest	Obs	Highest	Obs
6741.548	20	7508.884	16
6815.976	18	7515.384	7
6880.871	2	7708.118	5
7007.633	4	7775.888	15
7042.74	8	7813.863	14

Stem Leaf

78 1	1	
75 18	2	
74 177812	6	-----
72 13823677	8	-----
70 14018	5	-----
68 28	2	
68 4	1	

-----

Multiply Stem Leaf by 10\*\*2



SAS  
General Linear Models Procedure  
Class Level Information

Class	Level	Values
ESPECIE	5	CASUARINA EUCALYPTUS GHELINA QUERCUS SP SALICHA
REP	5	1 2 3 4 5

Number of observations in data set = 25

SAS  
General Linear Models Procedure

Dependent Variable: MAREDA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	4	12.06280000	3.01670000	1.55	0.2187
Error	16	15.88120000	0.992575000		
Corrected Total	24	27.94400000			

	R-Square	C.V.	Root MSE	MAREDA Mean
	0.43655	30.37079	0.996443	3.24800000

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REP	4	9.05612000	2.26403000	2.54	0.0789
ESPECIE	4	2.10478000	0.526195000	0.54	0.7081

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REP	4	9.05612000	2.26403000	2.54	0.0789
ESPECIE	4	2.10478000	0.526195000	0.54	0.7081

SAS  
General Linear Models Procedure

Dependent Variable: PREN

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	206.5368315	25.81710394	1.86	0.1378
Error	16	223.7403684	13.9837731		
Corrected Total	24	432.2782010			

	R-Square	C.V.	Root MSE	PREN Mean
	0.482417	11.58389	3.739488	32.2538800

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REP	4	125.1518842	31.2879235	2.24	0.1107
ESPECIE	4	83.3871374	20.8467843	1.49	0.2516

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REP	4	125.1518842	31.2879235	2.24	0.1107
ESPECIE	4	83.3871374	20.8467843	1.49	0.2516

SAS  
General Linear Models Procedure

Dependent Variable: VOLATIL

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	261.9853280	32.7481660	2.71	0.0428
Error	16	189.8682180	12.1036135		
Corrected Total	24	455.8415440			

	R-Square	C.V.	Root MSE	VOLATIL Mean
	0.57881	7.873310	3.478010	43.8332000

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REP	4	171.7502840	42.9375700	3.58	0.0288
ESPECIE	4	90.2350440	22.5567900	1.86	0.1681

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REP	4	171.7502840	42.9375700	3.58	0.0288
ESPECIE	4	90.2350440	22.5567900	1.86	0.1681

SAS  
General Linear Models Procedure

Dependent Variable: CDMIZAS

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	28.85880800	3.607351000	2.77	0.0384
Error	16	19.38313800	1.211446000		
Corrected Total	24	48.24194600			

	R-Square	C.V.	Root MSE	CDMIZAS Mean
	0.590841	38.87737	1.100857	2.75320000

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REP	4	4.84402400	1.211006000	1.00	0.4384
ESPECIE	4	22.01578400	5.503946000	4.54	0.0121

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REP	4	4.84402400	1.211006000	1.00	0.4384
ESPECIE	4	22.01578400	5.503946000	4.54	0.0121

SAS  
General Linear Models Procedure

Dependent Variable: KE

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	822333.1648	115291.6464	2.41	0.0643
Error	16	788919.3872	49307.4605		
Corrected Total	24	1611252.5520			

	R-Square	C.V.	Root MSE	KE Mean
	0.548001	2.885823	218.8348	7307.76828

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REP	4	78488.8881	19617.4695	0.41	0.7883
ESPECIE	4	843843.1668	210960.7921	4.40	0.0137

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REP	4	78488.8881	19617.4695	0.41	0.7883
ESPECIE	4	843843.1668	210960.7921	4.40	0.0137

SAS  
General Linear Models Procedure

Dependent Variable: FIJO

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	253.5870400	31.6983800	1.87	0.1174
Error	16	256.8247200	16.0515450		
Corrected Total	24	510.4117600			

	R-Square	C.V.	Root MSE	FIJO Mean
	0.498828	7.864648	4.008436	50.3680000

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REP	4	81.7538800	22.9364700	1.43	0.2887
ESPECIE	4	181.8332800	45.4583000	2.82	0.0821

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
REP	4	81.7538800	22.9364700	1.43	0.2887
ESPECIE	4	181.8332800	45.4583000	2.82	0.0821

SAS  
General Linear Models Procedure

Tukey's Studentized Range (SNK) Test for variable: PRED

NOTE: This test controls the type I experimentwise error rate, but generally has a higher type II error rate than REGW.

Alpha = 0.05 dfr 16 MSB: 12.98377  
Critical Value of Studentized Range: 4.333  
Minimum Significant Difference: 7.2486

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	SE	ESPECIE
A	35.448	5	OMELINA
A			
A	32.804	5	SALICHA
A			
A	32.283	5	EUCALYPTUS
A			
A	30.654	5	GUENON SP
A			
A	30.297	5	CASABIANA

SAS

## General Linear Models Procedure

Tukey's Studentized Range (SNK) Test for variable: MUEEDAD

NOTE: This test controls the type I experimentwise error rate, but generally has a higher type II error rate than REGMQ.

Alpha 0.05 df= 18 MSE= 0.97267  
 Critical Value of Studentized Range= 4.333  
 Minimum Significant Difference= 1.8113

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	ESPECIE
A	3.886	5	QUERCUS SP
A	3.530	5	EUCALYPTUS
A	3.080	5	CASUARINA
A	3.004	5	SALICHA
A	2.880	5	QUELINA

SAS

## General Linear Models Procedure

Tukey's Studentized Range (SNK) Test for variable: CENIZAS

NOTE: This test controls the type I experimentwise error rate, but generally has a higher type II error rate than REGMQ.

Alpha 0.05 df= 18 MSE= 1.211448  
 Critical Value of Studentized Range= 4.333  
 Minimum Significant Difference= 2.1328

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	ESPECIE
A	4.438	5	QUERCUS SP
B	3.014	5	CASUARINA
B	2.442	5	QUELINA
B	2.232	5	EUCALYPTUS
B	1.680	5	SALICHA

SAS

## General Linear Models Procedure

Tukey's Studentized Range (SNK) Test for variable: VOLATIL

NOTE: This test controls the type I experimentwise error rate, but generally has a higher type II error rate than REGMQ.

Alpha 0.05 df= 18 MSE= 12.10351  
 Critical Value of Studentized Range= 4.333  
 Minimum Significant Difference= 8.7408

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	ESPECIE
A	48.240	5	CASUARINA
A	44.728	5	QUERCUS SP
A	41.032	5	SALICHA
A	42.450	5	EUCALYPTUS
A	40.716	5	QUELINA

SAS

## General Linear Models Procedure

Tukey's Studentized Range (SNK) Test for variable: F130

NOTE: This test controls the type I experimentwise error rate, but generally has a higher type II error rate than REGMQ.

Alpha 0.05 df= 18 MSE= 16.05154  
 Critical Value of Studentized Range= 4.333  
 Minimum Significant Difference= 7.7838

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	ESPECIE
A	53.880	5	QUELINA
A	51.788	5	EUCALYPTUS
A	51.304	5	SALICHA
A	47.884	5	CASUARINA
A	47.182	5	QUERCUS SP

SAS

General Linear Models Procedure

Tukey's Studentized Range (SNK) Test for variable: ME

NOTE: This test controls the type I experimental error rate, but generally has a higher type II error rate than SNK.

Alpha: 0.05 df= 16 ME= 47832.46  
 Critical Value of Studentized Range: 4.333  
 Minimum Significant Difference: 424.21

Means with the same letter are not significantly different.

Tukey Grouping	Mean	N	ESPECIE
A	7802.0	5	SALICINA
B	7385.9	5	ONELINA
B	7274.8	5	EUCALYPTUS
B	7263.5	5	CASUARINA
B	7032.5	5	QUERCUS SP

SAS

General Linear Models Procedure  
 Class Level Information

Class	Levels	Values
ESPECIE	5	CASUARINA EUCALYPTUS ONELINA QUERCUS SP SALICINA
REP	5	1 2 3 4 5

Number of observations in data set = 25

SAS

General Linear Models Procedure  
 Multivariate Analysis of Variance

Characteristic Roots and Vectors of: E Inverse \* N, where  
 N = Type III SSACP Matrix for ESPECIE E = Error SSACP Matrix

Characteristic Root	Percent	Characteristic Vector V'(V)		
		PRUN CHILIAS	URUBAD FIJO	VOLATIL EX
2.00278513	84.89	0.07720033 -30.08783203	-20.34808231 -30.37086570	-30.41844731 -0.00018888
1.05638247	29.92	0.06474718 1.36794281	1.20067632 1.30457148	1.28502781 0.00087445
0.46731209	12.81	0.02367880 75.83467284	75.88727674 75.57884488	75.80000528 0.90154213
0.12288052	3.37	-0.03380008 103.83332787	104.94689848 103.53053127	103.88881888 0.00014888
0.00000000	0.00	0.04088888 -0.01203234	0.10088528 0.01848863	0.06383873 -0.00013284
0.00000000	0.00	-0.02373123 101.58242334	101.48888300 101.73288866	101.71884488 -0.00083170

Manova Test Criteria and F Approximations for  
 the Hypothesis of no Overall ESPECIE Effect  
 N = Type III SSACP Matrix for ESPECIE E = Error SSACP Matrix

Statistic	S=4 B=0.5 Med.5			Dof DF	Pr > F
	Value	F	Max DF		
Wilks' Lambda	0.09532158	1.5674	24	30.50446	0.1059
Pillai's Trace	1.80851304	1.5884	24	88	0.0840
Hotelling-Lowry Trace	3.64887021	1.4442	24	30	0.1521
Roy's Greatest Root	2.00278513	4.6732	8	14	0.0082

NOTE: F Statistic for Roy's Greatest Root is an upper bound.

The SAS System

OBS	ESPECIE	REP	PREN	HUMEDAD	VOLATIL	CENIZAS	FIJO	KR	HUF	VOP	PEC	PH
1	EUCALYPTUS	1	33.601	3.28	37.53	2.38	56.83	7324.82	2	3	2	3
2	EUCALYPTUS	2	21.438	3.66	40.81	5.51	50.02	6960.87	2	3	3	3
3	EUCALYPTUS	3	33.812	5.78	40.71	0.84	52.59	7372.60	3	3	1	3
4	EUCALYPTUS	4	38.742	3.00	50.00	1.14	45.88	7007.63	2	3	2	3
5	EUCALYPTUS	5	33.825	1.87	43.20	1.19	53.64	7708.12	1	3	2	3
6	GMELINA	1	38.810	3.73	40.53	2.31	53.43	7405.37	2	3	2	3
7	GMELINA	2	36.707	4.01	38.07	2.10	55.82	7515.38	3	3	2	3
8	GMELINA	3	38.976	2.62	42.53	2.24	52.81	7043.74	2	3	2	3
9	GMELINA	4	34.279	2.58	40.95	2.79	53.68	7356.48	2	3	2	3
10	GMELINA	5	28.457	1.98	41.51	2.77	53.76	7508.89	1	3	2	3
11	SALIGNA	1	33.147	4.08	43.48	2.45	50.00	7470.36	3	3	2	3
12	SALIGNA	2	29.553	5.26	43.27	1.78	48.69	7470.82	2	3	2	3
13	SALIGNA	3	38.857	2.10	45.15	1.10	51.65	7479.25	2	3	2	3
14	SALIGNA	4	32.722	1.57	43.79	1.62	53.02	7813.68	1	3	2	3
15	SALIGNA	5	30.852	2.03	44.46	1.35	52.16	7775.89	2	3	2	3
16	QUERCUS SP	1	29.516	3.68	36.29	3.06	56.98	7214.28	2	3	2	3
17	QUERCUS SP	2	30.550	4.09	38.28	3.98	53.86	7108.85	3	3	2	3
18	QUERCUS SP	3	30.153	2.80	51.98	4.89	40.55	7180.95	2	3	2	3
19	QUERCUS SP	4	30.794	3.88	47.98	5.16	42.98	6915.98	2	3	2	3
20	QUERCUS SP	5	32.277	3.87	49.12	5.20	41.82	6741.58	2	3	2	3
21	CASUARINA	1	27.352	4.08	44.85	3.22	47.85	7234.28	3	3	2	3
22	CASUARINA	2	26.397	3.98	43.00	3.53	48.51	7331.48	2	3	2	3
23	CASUARINA	3	36.411	1.84	50.56	1.08	48.52	7368.15	1	3	2	3
24	CASUARINA	4	33.175	2.42	50.78	3.66	43.14	7099.85	2	3	2	3
25	CASUARINA	5	28.148	3.00	42.01	3.58	51.41	7283.72	2	3	2	3

The SAS System

Analysis of Variance Procedure  
Class Level Information

Class	Levels	Values
REP	5	1 2 3 4 5
ESPECIE	5	CASUARINA EUCALYPTUS GMELINA QUERCUS SP SALIGNA

Number of observations in data set = 25

The SAS System

Analysis of Variance Procedure

Dependent Variable: HUF

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	1.68000000	0.46000000	1.19	0.3610
Error	16	6.16000000	0.38500000		
Corrected Total	24	9.84000000			

R-Square                      C.V.                      Root MSE                      HUF                      Mean

The SAS System

Analysis of Variance Procedure  
Class Level Information

Class	Levels	Values
REP	5	1 2 3 4 5
ESPECIE	5	CASUARINA ESCULETOPIUM QUERUS SP SALICINA

Number of observations in data set = 25

The SAS System

Analysis of Variance Procedure

Dependent Variable: CEP

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	8	3.62000000	0.452500000	1.14	0.3925
Error	16	2.64000000	0.165000000		
Corrected Total	24	4.64000000			

R-Square	Clf.	Root MSE	CEP	Mean
0.362069	20 10000	0.4037328	2.12000000	

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
REP	4	0.75000000	0.187500000	0.32	0.8575
ESPECIE	4	2.87000000	0.717500000	1.95	0.1518



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
 FACULTAD DE AGRONOMIA  
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES  
 AGRONOMICAS

Ref. Sem.005-98

LA TESIS TITULADA: "RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL CARBON VEGETAL PRODUCIDO A PARTIR DE CUATRO ESPECIES FORESTALES DE RAPIDO CRECIMIENTO (Eucalyptus saligna Sm., Eucalyptus grandis W.Hill ex Maid, Gnelina arborea Roxb. y Casuarina cunninghamiana Miq) Y ENCINO (Quercus pedunculata Née)"

DESARROLLADA POR EL ESTUDIANTE: OSCAR AUGUSTO HERNANDEZ CAMPOS

CARNET No: 88-16955

HA SIDO EVALUADA POR LOS PROFESIONALES: Ing. Agr. Edwin Cano  
 Ing. Agr. William Escobar

El Asesor y las Autoridades de la Facultad de Agronomía, hacen constar que ha cumplido con las normas universitarias y reglamentos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Ing. Agr. Walter Garcia Tello  
 ASESOR

Ing. Agr. Fernando Rodríguez  
 DIRECTOR DEL IIA.



I M P R I M A S E

Ing. Agr. Rolando Lara Alecio  
 DECANO



cc:Control Académico  
 Archivo  
 FR/prc.

APARTADO POSTAL 1545 • 01091 GUATEMALA, C. A.

TELEFONO: 769794 • FAX: (5022) 769770