

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN

DIRECCIÓN DE PROYECTOS

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INTEGRACIÓN BOSQUE INDUSTRIA

INFORME FINAL DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**PARÁMETROS ENERGÉTICOS DE RESIDUOS DE 10 ESPECIES
FORESTALES DE RÁPIDO CRECIMIENTO**

(DOCUMENTO II)

INVESTIGADORES:

*Ing. Roger Moya R. Ph.D.
Ing. Carolina Tenorio M. Lic.*

MARZO, 2013

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
DIRECCIÓN DE PROYECTOS**

**INFORME FINAL DE PROYECTO
(N° 5402-1401-1015)**

1. DATOS GENERALES

1. Nombre del Proyecto **“Parámetros energéticos de residuos de 10 especies forestales de rápido crecimiento”**.

2. Departamento académico o Centro responsable: Escuela Ingeniería Forestal / CIIBI.

3. Otros departamentos participantes:

4. Investigador(a) responsable: Ing. Roger Moya. Ph.D.

5. Investigadores participantes:

Nombre del(la) investigador(a) y grado académico	Jornada en el proyecto (hrs/sem)	Período	Nº de meses en el proyecto	Tipo de plaza*
Ing. Roger Moya Ph.D.	5	Enero-2011 Diciembre-2012	24	Docencia
Ing. Carolina Tenorio Lic	20	Enero-2011 Diciembre-2012	24	VIE

6. Fecha de inicio: 1° enero 2011

7. Fecha de finalización: 31 diciembre 2012

8. Sesión y fecha de aprobación de Escuela: Sesión ordinaria:

2. FUNDAMENTOS DEL PROYECTO O ANTECEDENTES

2.1. Objetivo General:

Determinar el poder calórico máximo, temperatura de ignición, contenido de cenizas materia volátil, y carbono fijo de 10 especies de plantaciones forestales de rápido crecimiento en Costa Rica y determinar la influencia del tamaño de las partículas producidas por astilladores y el contenido de humedad en el balance energético del secado de estas maderas.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar la relación matemática entre el contenido de humedad de la madera y los parámetros energéticos (poder calórico, punto de ignición, contenido de cenizas, material volátil y carbono fijo) de 10 especies de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.
- Determinar el balance energético real para diferentes dimensiones de partículas producidas por astilladores industriales provenientes de 10 especies de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

3. PLAN DE ACCIÓN

Objetivo	Cumplimiento	Productos	Observaciones
<p>Determinar la relación matemática entre el contenido de humedad de la madera y los parámetros energéticos (poder calórico, punto de ignición, contenido de cenizas, material volátil y carbono fijo) de 10 especies de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica</p>	<p>100%</p>	<p>Artículo científico que detalla las principales características químicas de las 10 especies forestales utilizadas (Anexo 1).</p> <p>Nota técnica presentada a la revista Kurú de la EIFO con las principales características químicas y energéticas de las 10 especies (Anexo 2).</p> <p>Artículo científico escrito que determina las características termogravimétricas y de combustión para las 10 especies (Anexo 3).</p>	<p>El artículo científico detalla las características generales (densidad, peso específico, etc), químicas (%C, %N, etc), y energéticas (% de materia volátil, índice de combustibilidad, poder calórico, etc) de las 10 especies utilizadas.</p> <p>La nota técnica, presenta en forma más resumida las principales características químicas y energéticas.</p> <p>El segundo artículo presenta el comportamiento termogravimétrico, y de combustión de las 10 especies utilizadas.</p>
<p>Determinar el balance energético real para diferentes dimensiones de partículas producidas por astilladores industriales provenientes de 10 especies de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.</p>	<p>75%</p>	<p>Artículo científico escrito que presenta los coeficientes de difusión de las astillas de madera de las 10 especies (Anexo 4).</p>	<p>No se tuvo el material suficiente para realizar los 3 tipos de secado (solar, aire y convencional), por lo que no se pudo determinar el balance energético de estas astillas. Esto debido a que en la actualidad no se contó con las empresas que suministraran el 100% del material para realizar las pruebas de balance energético. Solamente se contaba con una especie y el proyecto tenía como objetivo 10 especies.</p> <p>Este artículo científico presenta las curvas del contenido de humedad con respecto al tiempo para las diferentes dimensiones de astillas utilizadas, además de los coeficientes de difusión de cada astilla, para las 10 especies.</p>

4. GESTIÓN DEL PROYECTO E INCONVENIENTES

Aunque inicialmente se pensó que muchas de las pruebas iban a ser realizadas en el CEQUIATEC, se observó que en dicho centro existe una carencia de personal que conozca a detalle el manejo de los equipos nuevos que se han adquirido. Por tal motivo se estos se tuvieron que realizar pagando en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) y en el Laboratorio de Nanotecnología del CENAT. Los costos de estos análisis fueron cubiertos por fondos con que cuenta el centro, a través de FUNDATEC.

A pesar de que se tenía como objetivo específico realizar el balance energético para las diferentes dimensiones de astillas, este no se pudo realizar, ya no fue posible contar con el material necesario para realizar los secados (6 m^3). Esto debido a lo difícil que es que los productores de madera donen el material suficiente por parte de las empresas, por lo que se hizo las pruebas con hornos de laboratorio

5. APORTE DE INFRAESTRUCTURA: DOCENCIA DEL CENTRO O LA ESCUELA

Mantenimiento y reparación del vehículo Mitsubishi L200 placa # 265-183, utilizado durante el desarrollo del proyecto.

Por medio de este proyecto fue posible comprar la balanza de determinación de humedad, marca OCONY, modelo OHAUS MB45. Balanza de suma importancia en los estudios energéticos de la biomasa.

6. DIVULGACIÓN DE RESULTADOS

Fueron generados diferentes artículos científicos, notas técnicas y presentaciones en seminarios, los cuales se detallan a continuación:

6.1. Artículos científicos:

- Tenorio, C; Moya, R. 2012. Características de combustión y su relación con extractivos y propiedades químicas para 10 especies de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. (escrito, Anexo 1)

- Tenorio, C; Moya, R. 2012. Estudio termogravimétrico y de combustión de 10 especies forestales de rápido crecimiento en Costa Rica. (escrito, Anexo 3)
- Tenorio, C; Moya, R. 2012. Evaluación de la madera de plantaciones de rápido crecimiento como combustible y efectos de las características químicas y extraíbles sobre las características de calóricas. Nota técnica, Revista Forestal Mesoamericana Kuru. (Sometido, Anexo 2)
- Tenorio, C; Moya, R. 2012. Difusión del agua en astillas de madera de 10 especies de plantaciones forestales en Costa Rica (Escrito, Anexo 4)

6.2. Divulgación externa nacional

- XI Taller de Desechos Agroindustriales y Marinos ADAM-11, celebrado en la CENAT, San José, entre 26-28 de noviembre de 2012.
- Curso de Biomasa y Biomateriales: conceptos básicos e industriales, llevado a cabo en San Isidro de Pérez Zeledón el 20 de septiembre de 2012.
- Curso de Biomasa y Biomateriales: conceptos básicos e industriales, llevado a cabo en San Carlos el 25 de octubre de 2012.

6.3. Divulgación externa internacional

- No se presentaron estos resultados a nivel internacional.

6.4. Tesis llevadas a cabo

- No se llevaron a cabo tesis.

7. AGRADECIMIENTOS

Los investigadores de este proyecto dan las gracias a las siguientes personas, organizaciones y empresas: a los funcionarios del Centro de Investigación en Integración Bosque Industria (CIIBI) por su trabajo en la ejecución de las pruebas químicas y demás ensayos. A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por el financiamiento del proyecto. A las personas, empresas e instituciones: Maderas Cultivadas de Costa Rica S.A., Barca S.A., Precious Woods S.A., Estación Experimental Forestal Horizontes (SINAC-MINAET), Universidad EARTH, a los señores Ricardo Solano y Rafael Varela, por facilitar el material para la realización del proyecto.

8. ANEXOS

ANEXO 1: Tenorio, C; Moya, R. 2012. Características de combustión y su relación con extractivos y propiedades químicas para 10 especies de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica.

Características de combustión y su relación con extractivos y propiedades químicas para 10 especies de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica

Resumen

El objetivo de este estudio fue investigar las características de la madera como combustible (poder calórico e índice de combustibilidad) de 10 especies de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. Fue evaluado el efecto de las propiedades químicas, cantidad de extractivos y contenido humedad. Los resultados mostraron que el poder calórico máximo varió de 16500 a 20594 kJ/kg para la albura y de 16258 a 20119 kJ/kg para el duramen. No se presentó una consistencia con respecto a cual tipo de madera (albura o duramen) presenta el mayor o menor valor de poder calórico. En el caso del índice de combustibilidad (FVI), se presentan grandes variaciones entre las especies. Al evaluar el efecto de la humedad se encontró una relación lineal sobre el poder calórico, sin embargo la influencia de este parámetro es diferente para cada especie o tipo de madera. En el caso del duramen, la gradiente de la pendiente fue afectado por la lignina y los extraíbles en hidróxido de sodio y diclorometano, pero en albura solamente fue afectado significativamente por el porcentaje de cenizas. En relación con los parámetros químicos o la cantidad de extractivos, se encontró que el contenido de carbono, nitrógeno y lignina, la cantidad de cenizas y los extraíbles en diclorometano afectaron el poder calórico en la madera de duramen. En tanto que en la madera de albura, el poder calórico fue menos afectado, la cantidad de extraíbles en etanol-tolueno y la cantidad de cenizas afectó el poder calórico. Finalmente, el FVI fue afectado por la cantidad de carbono, los extraíbles en NaOH y diclorometano.

Palabras claves: *especies tropicales, índice de combustibilidad, albura, duramen, energía.*

1. Introducción

Costa Rica es un país pequeño, que ha introducido gran variedad de especies para la reforestación, orientadas principalmente a la producción de madera aserrada [1]. Sin embargo, solo unas pocas especies nativas y exóticas han adquirido importancia comercial en diversos proyectos de reforestación debido principalmente al conocimiento limitado de sus procesos genéticos, reproductivos y de manejo [2].

Especies de relativo rápido crecimiento (con períodos de rotación de menos de 25 años), como *Terminalia amazonia*, *Terminalia oblonga*, *Vochysia guatemalensis*, *Bombacopsis quinata*, *Alnus acuminata*, y *Swietenia macrophylla* (especies nativas) y *Tectona grandis*, *Cupressus lusitanica*, *Acacia mangium* y *Gmelina arborea* (especies exóticas), han demostrado excelentes resultados como especies de reforestación en plantaciones forestales [1-4]. Estas especies son ampliamente utilizadas en plantaciones forestales no solo por la calidad de su madera y por su rápido crecimiento, sino debido a que poseen la capacidad de adaptarse en áreas abandonadas, se pueden utilizar en sistemas agroforestales y en plantaciones mixtas, y además son aptas para el secuestro de carbono [4-7].

En los últimos años, con los problemas asociados al medio ambiente y al calentamiento global del planeta, amplias investigaciones se han llevado a cabo para encontrar fuentes de energía fiable y renovable para sustituir los combustibles fósiles. La biomasa forestal es reconocida como uno de los recursos más prometedores, debido a que los árboles absorben dióxido de carbono durante su crecimiento, por lo que la energía obtenida utilizando biomasa forestal sería carbono neutral [8].

En los procesos de transformación y aserrío de la madera se genera una enorme cantidad de residuos que pueden ser usados como fuentes de energía renovables [9-12]. La utilización de residuos ligno-celulósicos como material energético presenta muchas ventajas, entre las que destacan que sus componentes provienen de fuentes renovables o naturales [13]. Sin embargo, es importante indicar que una de las limitantes más grandes a las que se enfrenta este material es que en el caso de Costa Rica no se cuenta con un proceso industrial que verdaderamente haga utilización de los mismos [14]. De forma tal que para el medio costarricense y para algunos países en vías de desarrollo, la utilización de estos residuos constituiría una alternativa novedosa en el uso secundario de este tipo de material.

No obstante, para verdaderamente dar una utilidad a los residuos forestales en fuentes de energía calórica es necesario conocer las propiedades de combustión de las especies utilizadas en reforestación. Por ejemplo se ha mencionado que el poder calórico máximo de las maderas varía de 17600 a 18700 kJ por kg de materia seca. Sin embargo, este valor depende de muchos factores [15], entre los que se destaca la humedad presente en el residuo, por lo que se ha establecido una forma general de calcular el poder calórico en los diferentes grados de humedad $CV_{MC} = CV_{\text{máximo}} (1 - MC \cdot 100^{-1})$, donde CV_{MC} representa el poder calórico al contenido de humedad deseado, $CV_{\text{máximo}}$ el poder calórico máximo (de 17600 a 18700 kJ por kg) y el contenido de humedad en base húmeda a la que se desea determinar. Dicha ecuación no considera otros factores que afectan el valor calórico de la madera como lo son: la influencia de los extractivos, la cantidad de carbono, hidrogeno, y oxígeno, celulosas, hemicelulosas, ligninas y la proporción de otros componentes químicos [13,16].

Las maderas tropicales, por su parte, en general poseen proporciones diferentes de carbono, oxígeno e hidrogeno y desde luego diferencias en la cantidad de extractivos [17]. A pesar de esta diferencia, los valores de poder calórico, otros parámetros importantes en los valores de energía y la influencia de otras características de las maderas han sido tomados de estudios realizados para especies de clima temperados, lo cual puede traer consigo problemas en los cálculos energéticos en el momento de aprovechar las especies o la utilización de los residuos en los aserraderos.

En el caso de Costa Rica, con clima tropical, aunque actualmente se esté empezando a producir energía con residuos ligno-celulósicos a base de madera aún no se cuenta con la información de las características de combustión de las especies de mayor uso comercial, por lo que se requiere de investigaciones que determinen estos parámetros energéticos. De forma tal, que el presente estudio tiene como objetivo determinar los principales parámetros energéticos (poder calórico e índice de combustibilidad) de las 10 especies más utilizadas en plantaciones forestales en el país. Así mismo se presenta la relación de estas características con la humedad, composición química (lignina, celulosa y extractivos) y fracción de carbono. Esta información ayudará a las industrias, reforestadoras y a otros entes a dar uso integral de la materia prima generada en las plantaciones.

1. Metodología

2.1. Material utilizado y muestreo

Diez especies de plantaciones forestales de rápido crecimiento de Costa Rica fueron utilizadas. El rango de edades de las plantaciones fue de 6 a 21 años. La Tabla 1, presenta la densidad y las condiciones dasométricas de las plantaciones. Tres árboles fueron seleccionados con un diámetro cercano al promedio de cada plantación. Los árboles muestreados presentaban buena forma y estaban libres de daños de ataques de insectos u hongos. De cada árbol fue cortada una troza de 1 metro en la base del árbol y pintada en sus extremos con el fin de disminuir la pérdida de humedad.

Tabla 1. Características dasométricas de las plantaciones utilizadas.

Especies	Edad (años)	Densidad (árboles/ha)	Altura total (m)	Diámetro (cm)
<i>Alnus acuminata</i>	11	338	20.99	27.90
<i>Acacia mangium</i>	6	800	11.89	17.87
<i>Bombacopsis quinata</i>	14	265	22.58	36.99
<i>Cupressus lusitanica</i>	18	400	17.60	33.65
<i>Gmelina arborea</i>	6	1000	15.90	20.60
<i>Swietenia macrophylla</i>	21	21	9.49	18.15
<i>Tectona grandis</i>	9	509	14.99	20.50
<i>Terminalia amazonia</i>	12	378	18.54	21.48
<i>Terminalia oblonga</i>	20	221	14.35	23.48
<i>Vochysia guatemalensis</i>	10	641	21.83	23.07

2.2. Obtención de muestras

De cada troza fueron cortadas secciones transversales de aproximadamente de 5 cm. Seguidamente cada sección transversal fue cortada por la mitad, y luego fueron extraídas 5 astillas de aproximadamente 6 cm de ancho y de 1 cm de espesor. Dichas astillas fueron utilizadas para determinar el contenido de humedad (MCg), el peso específico (SG) y la densidad en condición verde (GD). La cantidad total de astillas fue de 135. La determinación del poder calórico (CV), el porcentaje de cenizas, el porcentaje de carbono (C), nitrógeno (N), la relación carbono/nitrógeno (C/N) y el porcentaje de extractivos se realizó a través de la extracción de aserrín, resultante del proceso de aserrío de las trozas de cada una de las especies, dicho aserrín fue tamizado en mallas de 0.25 mm y 0.42 mm (40 to 60 meshes respectively), hasta obtener aproximadamente 8 gramos para cada prueba.

2.3. Determinación del poder calórico

El poder calórico (CV) fue determinado desde condición verde hasta la condición sin presencia de agua, obteniendo muestras en diferentes MCg. Se utilizó el aserrín tamizado de entre 0.25 mm y 0.42 mm y fue seleccionado el tamaño de partículas colectadas entre la malla de 40 y 60 mesh. Se obtuvo aproximadamente 100 gramos de material tamizado. Luego este material fue esparcido sobre una superficie plana para que se fuera secando a temperatura ambiente, período que tardó en promedio alrededor de 15 horas para todas las especies. Durante este período, cada 30 minutos fueron extraídos aproximadamente 8 gramos de muestras, con el fin de obtener material para los diferentes MCg y así tener la variación del CV con el MCg. Posteriormente, las muestras fueron divididas en dos partes: 1 gramo para la determinación del MCg y tres muestras de 2 gramos para la determinación del CV. El CV obtenido cuando la muestra fue recién cortada se llama CV verde, y el CV cuando

el MCg fue de 0% se llamo CV máximo. El CV se basa en la determinación de la cantidad de energía total que un material orgánico emite, en este caso se determinó usando la prueba calorimétrica de Parr's mediante la norma ASTM D-5865 [18].

2.4. Características de combustión

El porcentaje de Carbono (C), Nitrógeno (N) y la relación C/N fueron determinados mediante el uso del Elementar Analysensysteme, modelo Vario Macro Cube. También fue determinado el índice de combustibilidad (FVI) que toma como referencia el poder calórico neto, la densidad y el porcentaje de cenizas (Ecuación 1) basados en la metodología propuesta por Purohit y Nautiyal [19].

$$\text{Indice combustibilidad} = \frac{(\text{Poder calorico máximo} * \text{Densidad})}{\text{Porcentaje cenizas} * 100} \quad (1)$$

2.5. Determinación del contenido de humedad en verde, peso específico y densidad

El cálculo MCg está referido a la humedad que presenta la madera en el momento del corte, comúnmente denominado como humedad en verde. Las astillas fueron pesadas en el momento del corte y fueron colocadas por 24 horas en un horno de circulación de aire forzado a una temperatura de 103 °C, acorde con la norma ASTM D-4442 [20]. Luego de ese período se volvía a pesar, para obtener el peso seco. Finalmente se aplicó la ecuación 2. En la determinación del peso específico básico (SG) y la densidad verde (GD). El volumen de la astilla fue determinado por desplazamiento de volumen de agua sobre una balanza. Para el SG (peso seco/volumen verde) se utilizó la norma ASTM-143 [21]. Y para la GD se utilizó la relación peso verde/volumen verde.

$$MCg = \frac{(\text{Peso verde} - \text{Peso seco})}{\text{Peso verde}} \times 100 \quad (2)$$

2.6. Determinación de las propiedades químicas

Fueron determinadas el contenido de cenizas, la cantidad de lignina y celulosa. En la determinación de la cantidad de cenizas se siguió la norma ASTM D-1102-84 [22], en la cuantificación de lignina se utilizó el método TAPPI T222 om-02 [23] y en la determinación de celulosa se siguió el procedimiento seguido por Seifert [24]. En cada tipo de determinación se utilizaron 3 muestras diferentes.

2.7. Extraíbles en diferentes solventes

Los extraíbles fueron determinadas en agua (caliente y temperatura ambiente), acorde con la norma ASTM D-1110-84 [25], en hidróxido de sodio (NaOH) utilizando el estándar ASTM D-1109-84 [26], en una solución de etanol-tolueno con el estándar ASTM D-1107-96 [27] y en diclorometano (CH₂-Cl₂) usando la norma ASTM D-1108-96 [28]. De cada tipo de extraíbles se realizaron 3 muestras.

2.8. Análisis estadísticos

Se realizó un análisis descriptivo (promedio, desviación estándar, valores máximos y mínimos) para todas las variables de respuesta. Además, se analizaron los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianza, así como la presencia de datos extremos. Se aplicó el procedimiento GLM de SAS (SAS Institute 1997) para estimar la significancia de las fuentes de variación. Se determinó la existencia de diferencias significativas entre los promedios del poder calórico máximo y verde, MCg, GD, cenizas, Carbono (C), Nitrógeno (N), la relación C/N, extractivos, lignina y celulosa, mediante la prueba de Tukey ($P < 0.05$). En orden de establecer la relación entre el contenido de humedad y el poder calórico se aplicó un análisis de regresión del tipo $Y = \beta_0 + \beta_1 X$. Finalmente se llevó a cabo un análisis de correlación entre los parámetros calóricos (CV y FVI) y la gradiente de curva (β_0) y las características físicas, químicas y los extractivos.

3. Resultados

3.1. Parámetros calorimétricos

Los parámetros energéticos son mostrados en la figura 1. En el caso del CV máximo (CV a 0% de MCg) los valores variaron de 16500 a 20594 kJ/kg para la albura y de 16258 a 20119 kJ/kg para el duramen (Figura 1a). *B. quinata*, *A. mangium*, *G. arborea* y *A. acuminata* presentan los valores más altos en albura, en tanto *G. arborea* y *S. macrophylla* presentan los valores más altos en el duramen. En las especies que se presentan albura y duramen no hay una consistencia en cual tipo de madera presenta mayor CV. *A. mangium* y *T. grandis* la albura presenta mayor CV que la madera de duramen. Por el contrario, *C. lusitanica* y *S. macrophylla*, el duramen presenta CV que la madera de albura, En tanto que en *G. arborea* no se presenta diferencia en los dos tipos de madera (Figura 1a). En el caso del índice de combustibilidad (FVI), se presentan grandes variaciones entre las especies (Figura 1b). *C. lusitanica* (6390) posee un valor muy superior al resto de las especies. Posteriormente se presenta un grupo de especies con valores próximos a 3000, compuesta por *T. amazonia*, *S. macrophylla*, *A. mangium*, *A. acuminata* y *T. grandis*. Finalmente, 4 especies (*G. arborea*, *T. oblonga*, *V. guatemalensis* y *B. quinata*) presentan FVI bajos.

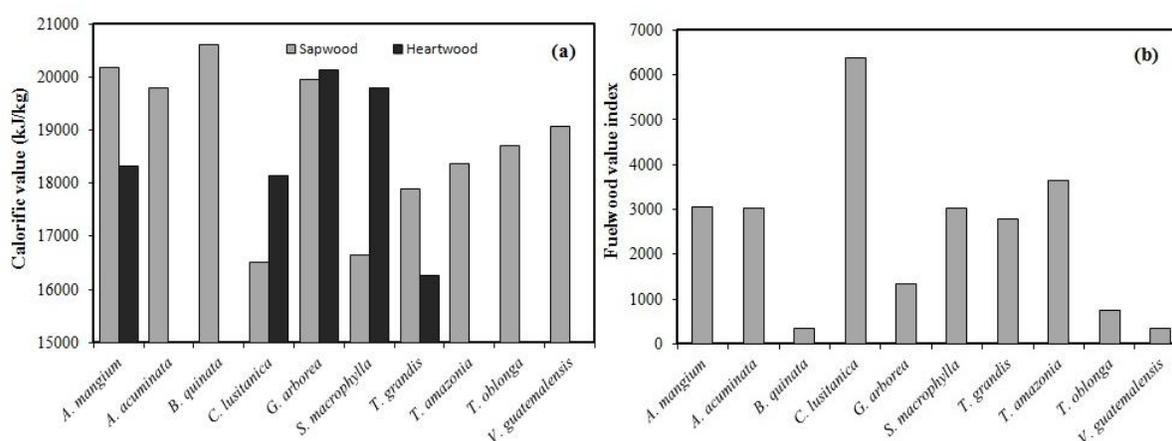


Figura 1. Maximum calorific value (a) and fuelwood value index (b) of ten fast-growth species in Costa Rica.

3.2. Variación del poder calórico con el contenido de humedad

La figura 2, muestra el comportamiento del CV por la variación del MCg en las 10 especies, tanto para albura como para duramen, como era de esperar el comportamiento del CV fue inversamente proporcional con el incremento del MCg. En las especies que presentan tanto madera de albura como de duramen no hay una tendencia clara para decir que un tipo de madera presenta mayor CV que otro. En *C. lusitanica*, *S. macrophylla* y *G. arborea* se observa que la madera de duramen posee valores de CV más altos en comparación con la madera de albura (Figuras 2d, e, f). *A. mangium* tiene un comportamiento similar, pero en MCg menor a 10%, la albura posee valores de CV mayores al duramen (Figura 2a). El caso de *T. grandis* es contrario a los anteriores, el duramen posee valores de CV más bajos que la albura (Figura 2g).

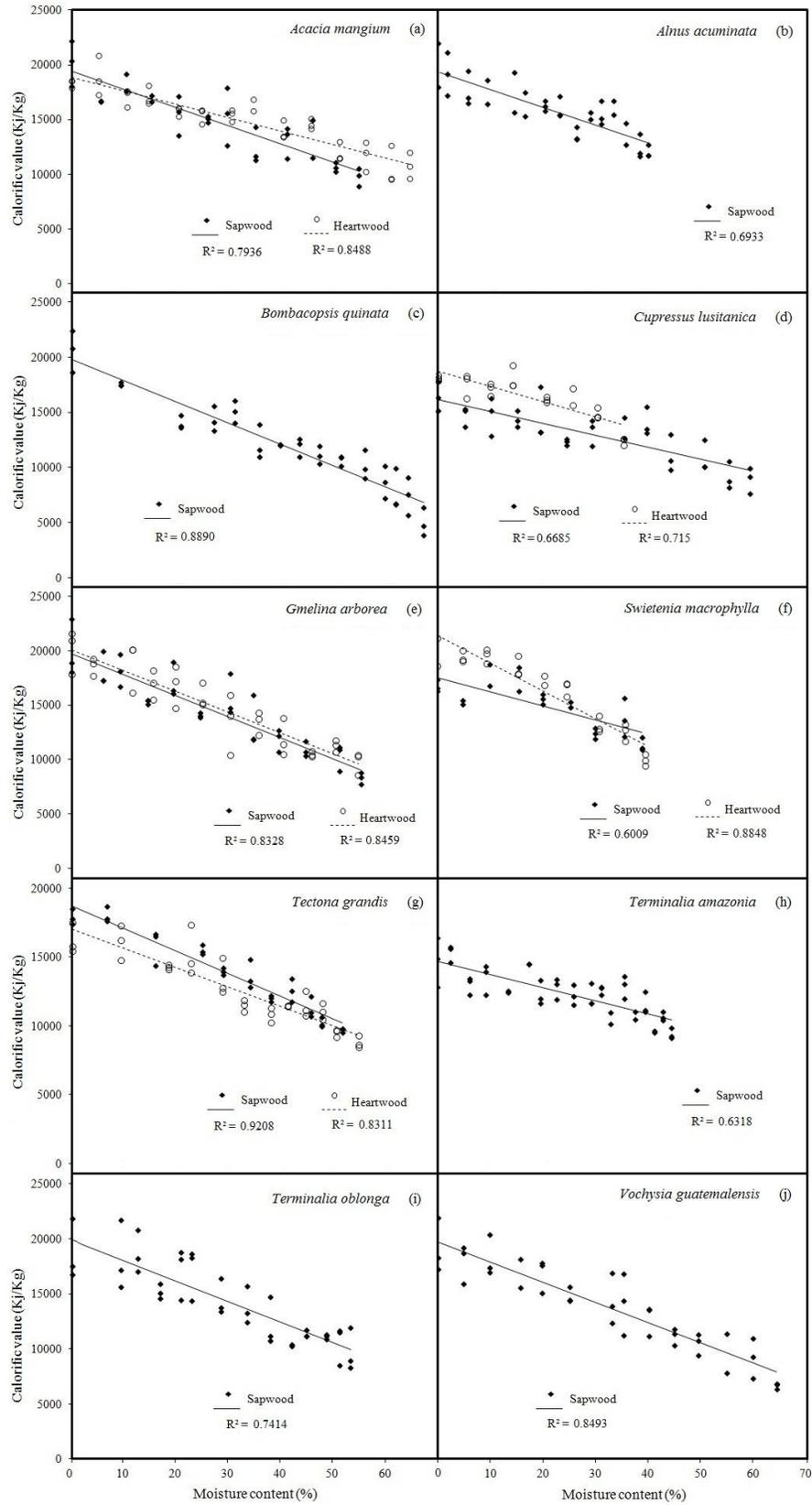


Figura 2. Calorific value according to moisture content of ten fast-growth species in Costa Rica.

Para las 10 especies, se encontró que el poder calórico puede ser modelado con respecto a la disminución del MCg por una relación lineal de tipo $CV = \beta_0 * MCg + \beta_1$. En la tabla 2, se muestran los diferentes coeficientes del modelo, los coeficientes de determinación (R^2) y su significancia. Los R^2 más bajos se encontraron en la madera de albura de *T. amazonia* (0.63), *C. lusitanica* (0.67) y *A. acuminata* (0.69). La albura de *T. grandis* presenta el R^2 más alto con 0.92, seguida de *B. quinata* con 0.89. El intercepto de las ecuaciones (β_0), en este modelo representa el valor estimado del CV a un MCg de 0% y sus valores varían de 17040 a 21301 kJ/kg en el duramen, y de 16194 a 19899 kJ/kg en la albura. En este caso *S. macrophylla* y *G. arborea* presentan los valores más altos en el duramen, con 21301 y 20078 kJ/kg, respectivamente. Los valores más bajos los presenta la albura de *C. lusitanica* (16194 kJ/kg) y el duramen de *T. grandis* (17040 kJ/kg). La pendiente de la ecuación representa como cambia el CV según el cambio de 1% en el MCg. *S. macrophylla* (-253.53 kJ/% MCg) es la especie que pierde mayor CV conforme disminuye en 1% en MCg. Por el contrario *C. lusitanica* es la especie que menos CV pierde al disminuir el MCg, con -109.17 kJ/% MCg. El resto de las especies se encuentran en el rango de -194.35 a -118.87 kJ/% MCg.

Tabla 2. Statistical parameters of linear regression analysis ($CV = \beta_0 * MCg + \beta_1$) between calorific value and moisture content of sapwood and heartwood of ten fast-growth species in Costa Rica.

Specie	Wood type	Model Coefficients		F-value	R^2
		β_1	β_0		
<i>Acacia mangium</i>	Sapwood	19417.00	-168.51	119.16	0.79
	Heartwood	18870.00	-124.72	218.85	0.85
<i>Alnus acuminata</i>	Sapwood	19192.00	-160.71	81.40	0.69
<i>Bombacopsis quinata</i>	Sapwood	19816.00	-194.35	344.35	0.89
<i>Cupressus lusitanica</i>	Sapwood	16193.78	-109.17	75.59	0.67
	Heartwood	18801.11	-139.64	52.68	0.71
<i>Gmelina arborea</i>	Sapwood	19698.00	-193.44	169.34	0.83
	Heartwood	20078.00	-191.81	186.66	0.85
<i>Swietenia macrophylla</i>	Sapwood	17458.00	-129.92	31.62	0.60
	Heartwood	21301.00	-253.53	176.59	0.88
<i>Tectona grandis</i>	Sapwood	18706.00	-165.99	360.48	0.92
	Heartwood	17040.00	-142.03	167.33	0.83
<i>Terminalia amazonia</i>	Sapwood	18395.00	-118.87	80.67	0.63
<i>Terminalia oblonga</i>	Sapwood	19899.00	-186.84	111.79	0.74
<i>Vochysia guatemalensis</i>	Sapwood	19636.00	-182.51	214.10	0.84

3.3. Propiedades físicas y químicas

Las propiedades físicas y químicas obtenidas para las 10 especies son mostradas en la tabla 3. Y se observó que: (i) la variación de la densidad verde (GD) fue de 0.67 a 1.12 g/cm³. Un primer grupo, con GD mayor a 1 g/cm³ es compuesto por *T. grandis* y *A. mangium*. Un segundo grupo compuesto por especies con valores estadísticamente menores al primer grupo, de 0.91 a 0.95 g/cm³, compuesto por *G. arborea*, *S. macrophylla* y *T. oblonga*. El tercer grupo lo componen *T. amazonia* y *B. quinata*, con 0.87 y 0.86 g/cm³ respectivamente. *C. lusitanica* y *V. guatemalensis* componen el cuarto grupo ambas con 0.75 g/cm³. Finalmente *A. acuminata* con 0.67 g/cm³, valor estadísticamente diferente a todos los anteriores. (ii) En la SG se presentó una variación de 0.26 a 0.60. El análisis de medias mostró que solamente en *A. mangium* (0.37) y *A. acuminata* (0.36) los valores no presentaron diferencias estadísticas. A diferencia del resto de la especies que se presentó valores de SG estadísticamente diferentes (valor p <0.05) entre ellos (Tabla 3). (iii) En el MCg, se encontró que los valores más altos se presentaron en *A. mangium* y *V. guatemalensis* y la especie con menor MCg se presentó *T. oblonga*. Seguidamente *G. arborea* y *T. grandis* presentaron MCg con valores intermedios (entre 41.81% y 63.34%) y luego de ellas, con valores de MCg estadísticamente menores *S. macrophylla* y *T. amazonia*. En tanto que el resto de las especies son diferentes entre ellas y con los grupos anteriores.

En tanto que en la composición química se determinó que: (i) *B. quinata* y *V. guatemalensis* presentan los porcentajes de cenizas más altos, pero con diferencias estadísticas entre ellos, mientras que *C. lusitanica*, *A. acuminata* y *T. amazonia* (0.41%) presentan los valores estadísticamente más bajos. El resto de las especies presentan diferencias estadísticas entre ellas, con valores que van de 0.58% a 2.81% (ii) En relación con el porcentaje de C se encontró que *C. lusitanica* y *T. grandis* presentan los porcentajes más altos, posteriormente, y con menor contenido de C, se presentan 4 especies (*A. mangium*, *B. quinata*, *G. arborea* y *S. macrophylla*). Seguidamente *T. amazonia*, *A. acuminata* y *T. oblonga*, forman un tercer grupo. Finalmente *V. guatemalensis* presenta el contenido de C más bajo y es estadísticamente diferente al resto de las especies (Tabla 2). (iii) El porcentaje de N, fue el parámetro donde se presentaron la menor cantidad diferencias estadísticas entre especies (Tabla 3). Un grupo con valores entre 0,27% a 0,34%, lo conforman *V. guatemalensis*, *T. oblonga*, *A. acuminata*, *C. lusitanica* y *T. amazonia*. Otro grupo, con contenidos de N menores a 0.26%, es formado por *B. quinata* y *S. macrophylla*. Finalmente *G. arborea* y *T. grandis*, presentan los porcentajes estadísticamente más bajos de N, con 0.20%. (iv) La relación C/N presenta valores que varían de 138.49 a 249.79. Las especies se concentraron en 2 grupos, el primer grupo corresponde a las especies de valores más altos de 185.56 a 249.79 que incluye a *G. arborea*, *T. grandis*, *S. macrophylla*, *B. quinata* y *C. lusitanica* y un segundo grupo va de 138.49 a 185.56 que incluye al resto de las especies. (v) El porcentaje de celulosa varió de 40.07% a 49.58%. El análisis estadístico mostro que *B. quinata*, *A. mangium* y *G. arborea* son las especies con los porcentajes de celulosa mayores a 47.41%. Un segundo grupo con valores que van de 43.83% a 46.00% es compuesto por las especies *V. guatemalensis*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *C. lusitanica*. *A. acuminata*, *S. macrophylla* y *T. oblonga*, presentan los valores estadísticamente más bajos entre 40.07% a 43.19%. (vi) El contenido de lignina presentó valores que van de 21.95% a 48.39% (Tabla 3). *V. guatemalensis* y *C. lusitanica* presentaron los valores estadísticamente más altos con 48.39% y 46.77% respectivamente. Un segundo grupo de especies compuesto por *B. quinata* y *T. oblonga* presentaron un contenido de lignina de 39.92% y 38.31%, seguidas de *A. acuminata*, *A. mangium*, *T. amazonia* y *S. macrophylla* con valores que varían de 30.96% a 33.01%. Finalmente, los porcentajes estadísticamente más bajos son para *T. grandis* con 21.95% y *G. arborea* con 24.20%.

Tabla 3. Propiedades físicas y químicas para 10 especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales en Costa Rica.

Especie	Densidad verde (g/cm ³)	Peso específico básico	Contenido de humedad verde (%)	Cenizas (%)	Carbono (%)	Nitrógeno (%)	Relación Carbono-Nitrógeno	Celulosa (%)	Lignina (%)
<i>Acacia mangium</i>	1.08 ^B (0.04)	0.37 ^G (0.06)	66.72 ^A (4.89)	0.58 ^{EF} (0.09)	48.48 ^B (0.12)	0.28 ^{AB} (0.04)	175.20 ^B (24.03)	49.31 ^{AB} (2.00)	31.43 ^D (3.80)
<i>Alnus acuminata</i>	0.67 ^G (0.07)	0.36 ^G (0.04)	46.48 ^D (1.79)	0.38 ^{FG} (0.06)	47.74 ^C (0.09)	0.30 ^{AB} (0.01)	159.70 ^B (8.04)	43.19 ^{DE} (1.37)	33.01 ^{CD} (1.79)
<i>Bombacopsis quinata</i>	0.86 ^E (0.05)	0.32 ^H (0.04)	63.34 ^B (4.45)	3.99 ^A (0.51)	48.68 ^B (0.10)	0.26 ^{BC} (0.02)	187.97 ^{AB} (14.40)	49.58 ^A (3.80)	39.92 ^B (1.44)
<i>Cupressus lusitanica</i>	0.75 ^F (0.07)	0.42 ^E (0.04)	44.50 ^E (7.31)	0.19 ^G (0.04)	50.18 ^A (0.21)	0.27 ^{ABC} (0.01)	185.56 ^{AB} (10.25)	46.00 ^{BCD} (1.53)	46.77 ^A (1.76)
<i>Gmelina arborea</i>	0.91 ^D (0.14)	0.39 ^F (0.04)	56.97 ^C (5.90)	0.96 ^E (0.08)	48.39 ^B (0.14)	0.20 ^C (0.05)	249.79 ^A (74.39)	47.41 ^{ABC} (1.48)	24.20 ^E (1.66)
<i>Swietenia macrophylla</i>	0.94 ^{CD} (0.04)	0.54 ^B (0.03)	41.81 ^F (2.73)	0.64 ^{EF} (0.04)	48.75 ^B (0.25)	0.24 ^{BC} (0.00)	199.53 ^{AB} (3.09)	43.15 ^{DE} (0.88)	30.96 ^D (2.28)
<i>Tectona grandis</i>	1.12 ^A (0.02)	0.49 ^D (0.04)	56.43 ^C (3.82)	2.81 ^C (0.13)	49.77 ^A (0.15)	0.20 ^C (0.01)	249.11 ^A (16.21)	44.45 ^{CD} (0.78)	21.95 ^E (2.58)
<i>Terminalia amazonia</i>	0.87 ^E (0.08)	0.51 ^C (0.04)	41.66 ^F (2.07)	0.41 ^{FG} (0.07)	47.83 ^C (0.18)	0.27 ^{ABC} (0.02)	176.84 ^B (10.98)	45.81 ^{BCD} (1.64)	31.36 ^D (1.20)
<i>Terminalia oblonga</i>	0.95 ^C (0.07)	0.60 ^A (0.07)	37.16 ^G (3.62)	1.84 ^D (0.07)	47.69 ^C (0.28)	0.31 ^{AB} (0.05)	154.86 ^B (20.56)	40.07 ^E (1.45)	38.31 ^{BC} (2.18)
<i>Vochysia guatemalensis</i>	0.75 ^F (0.08)	0.26 ^I (0.03)	65.32 ^A (2.29)	3.47 ^B (0.46)	46.38 ^D (0.06)	0.34 ^A (0.04)	138.49 ^B (15.08)	43.83 ^D (2.09)	48.39 ^A (6.54)

Nota: letras diferentes para cada una de las características significan diferencias estadísticas a un 95%.

3.4. Cantidad de extraíbles

La tabla 4 presenta el porcentaje de extraíbles en diferentes tipos de solventes para las 10 especies y se observó que: (i) para los extraíbles en hidróxido de sodio, el análisis estadístico mostro que las especies de mayor valor (mayor a 22.40%) son *G. arborea*, *T. grandis* y *T. amazonia*. Un segundo grupo compuesto por *S. macrophylla*, *V. guatemalensis* y *T. oblonga* presenta valores entre 19.02% a 21.18%. Un tercer grupo, con el porcentaje de extraíbles más bajos, menor a 13,21%, lo conforman *A. mangium*, *C. lusitanica* y *B. quinata*. (ii) para los extraíbles en agua caliente, se encontró que los mayores porcentajes (mayor a 11.21%) se presentan *T. amazonia* y *T. oblonga*. En tanto que *A. acuminata* y *A. mangium*, poseen los valores más bajos, menor a 2.45%. El resto de las especies que se ubican entre el rango de 6.16% a 10.02% y no presentan diferencias estadísticas entre ellas. (iii) para los extraíbles en agua fría, el análisis estadístico agrupo las especies en dos, el primer grupo lo componen *G. arborea*, *T. grandis*, *V. guatemalensis*, *T. amazonia* y *S. macrophylla*, con valores mayores a 11.33%, el segundo grupo está compuesto *C. lusitanica*, *B. quinata*, *A. acuminata* y *A. mangium* con porcentajes de extraíbles menores a 8.22%. En el caso de *T. oblonga* esta especie (10.04%) forma parte de ambos grupos. (iv) el análisis de los extraíbles en diclorometano, permite separar 3 grupos de especies, el primero formado por *C. lusitanica*, *A. mangium*, *V. guatemalensis* y *B. quinata*, con los mayores porcentajes. El segundo formado

por *G. arborea*, *T. grandis*, *S. macrophylla* y *A. acuminata*, especies con valores intermedios de 1.27% a 2.20%. Finalmente las especies con menor porcentaje de extraíbles fueron *T. oblonga* y *T. amazonia*. (v) para los porcentaje de extraíbles en etanol-tolueno no se presentó ninguna diferencia estadística (valor $p < 0.05$) entre las especies y los valores variaron de 0.95% (*A. mangium*) a 3.87% (*S. macrophylla*).

Tabla 4. Análisis de extractivos para 10 especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales en Costa Rica.

Especie	Extractivos (%) solubles en:				
	Hidróxido de sodio (al 1%)	Agua caliente	Agua fría	Diclorometano	Etanol-Tolueno
<i>Acacia mangium</i>	13.21 ^{EF} (1.17)	2.45 ^D (0.87)	2.00 ^D (0.93)	3.25 ^{AB} (1.14)	0.95 ^A (0.43)
<i>Alnus acuminata</i>	16.31 ^{DE} (1.76)	2.74 ^D (0.46)	2.32 ^{BD} (0.65)	1.27 ^{BC} (0.49)	1.05 ^A (0.56)
<i>Bombacopsis quinata</i>	11.08 ^F (0.49)	6.16 ^{CD} (1.50)	6.80 ^{BD} (0.49)	2.52 ^{ABC} (0.73)	1.26 ^A (0.61)
<i>Cupressus lusitanica</i>	11.84 ^F (0.51)	8.01 ^{BC} (1.27)	8.22 ^{BD} (1.03)	4.61 ^A (1.69)	2.21 ^A (0.99)
<i>Gmelina arborea</i>	26.13 ^A (0.56)	7.81 ^{BC} (0.15)	14.17 ^A (0.08)	2.21 ^{BC} (0.12)	0.82 ^A (0.49)
<i>Swietenia macrophylla</i>	21.18 ^{BC} (0.71)	9.65 ^{BC} (1.81)	11.33 ^{AC} (1.59)	1.49 ^{BC} (0.75)	3.87 ^A (1.85)
<i>Tectona grandis</i>	23.82 ^{AB} (1.17)	7.22 ^{BC} (0.87)	13.01 ^A (0.93)	2.20 ^{BC} (0.08)	1.18 ^A (0.00)
<i>Terminalia amazonia</i>	22.40 ^{ABC} (1.06)	15.28 ^A (1.62)	11.72 ^A (1.18)	1.04 ^C (0.67)	3.38 ^A (0.12)
<i>Terminalia oblonga</i>	19.02 ^{CD} (2.81)	11.21 ^{AB} (2.82)	10.04 ^{BC} (1.07)	1.05 ^C (0.38)	2.87 ^A (0.81)
<i>Vochysia guatemalensis</i>	20.99 ^{BC} (3.97)	10.02 ^{BC} (1.68)	11.95 ^A (1.21)	2.91 ^{ABC} (1.29)	2.84 ^A (1.57)

Nota: letras diferentes para cada una de las características significan diferencias estadísticas a un 95%.

3.5. Efecto de las propiedades físicas y químicas y del contenido de extraíbles en los parámetros energéticos.

Para el duramen, el contenido de C y la cantidad de cenizas afectaron negativamente el CV máximo y la cantidad de N, lignina y los extraíbles en diclorometano afectaron positivamente y significativamente el CV verde, en tanto que la cantidad de cenizas afecto negativamente y significativamente el CV verde (Tabla 5). En tanto que la albura, presente en todas las especies, el poder calórico fue menos afectado. El CV máximo fue afectado significativamente por la cantidad de extraíbles en etanol-tolueno, en tanto que la cantidad de cenizas afectó el CV verde.

El FVI fue el más afectado por los parámetros químicos o extractivos en la madera. El C, la lignina y los extraíbles diclorometano afectaron positivamente, en tanto que los extraíbles en NaOH afectaron negativamente el FVI. Finalmente los gradientes (β_0) en los modelos de

variación del CV con la disminución del MCg, fue encontrado que los extraíbles en agua caliente y etanol-tolueno afectan negativamente estos gradientes en el duramen, pero en la albura este parámetro fue afectado solamente por el contenido de cenizas (Tabla 5).

Tabla 5. Coeficientes de correlación entre los parámetros energéticos y los componentes químicos y extraíbles en diferentes solventes para 10 especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales en Costa Rica.

Características	Duramen			Albura			FVI
	CV máximo	CV verde	β_0	CV máximo	CV verde	β_0	
Densidad verde	-0.46	-0.74	0.20	0.47	0.31	-0.59	-0.60
Peso específico básico	-0.10	-0.42	-0.64	-0.72	0.76	0.41	-0.00
Carbono	-0.68*	0.35	0.40	-0.45	0.06	0.41	0.77**
Nitrógeno	0.03	0.80**	0.31	0.15	-0.07	-0.05	0.65
Relación C/N	-0.10	-0.75	-0.16	-0.11	0.00	-0.05	-0.62
Cenizas	-0.67*	-0.80**	0.17	0.34	-0.78**	-0.65**	-0.41
Celulosa	0.10	0.32	0.61	0.45	-0.44	-0.10	-0.11
Lignina	0.06	0.96**	0.19	-0.11	-0.45	0.10	0.92**
Extraíbles en	NaOH	0.18	-0.86*	-0.50	0.28	-0.10	-0.80**
	Agua caliente	0.28	-0.12	-0.71*	-0.45	0.11	0.09
	Agua fría	0.13	-0.55	-0.52	-0.39	-0.12	-0.38
	Diclorometano	-0.27	0.88**	0.70*	-0.14	-0.48	0.15
Etanol-Tolueno	0.32	0.17	-0.72*	-0.64**	0.28	0.51	0.33

Nota: * parámetro estadísticamente significativo al 95% y ** parámetro estadísticamente significativo al 99%. CV máximo = poder calórico a 0% de MC, CV verde = poder calórico al máximo MC de la madera.

4. Análisis de resultados

El rango de variación (16500 a 20594 kJ/kg) encontrado en CV máximo de las 10 especies plantación de rápido crecimiento de Costa Rica (Figura 1a) concuerda con los valores encontrados para otras especies tropicales, pero creciendo en la India [29,30]. Así mismo en las especies que se presentan albura y duramen, la falta de consistencia de cuál de estos dos tipos de madera presenta mayor CV, también ha sido señalado por otros autores [30-32]. Dichos autores encontraron que en algunas especies la albura presenta mayor CV que el duramen, pero para otras especies fue contrario, la madera de duramen presentó un CV más alto. Resultados similares a los obtenidos en el presente estudio, donde en *A. mangium* y *T. grandis* la albura presenta mayor CV máximo que la madera de duramen, pero en *C. lusitanica*, *G. arborea* y *S. macrophylla*, el duramen presenta mayor CV que la albura (Figura 1a).

Algunos estudios, como los llevados a cabo por Singh and Khanduja [33] y Goel and Belh [34] señalan que las especies de alto SG y alto GD poseen los valores CV más altos, y que además presentan un lento quemado, haciéndolas más deseables como combustibles. Pero la capacidad de combustión de una especie también depende de su MCg [35-37]. Un alto valor de MCg hace menos eficiente a la madera como combustible, debido a que el valor del

CV máximo es reducido. Sin embargo, en el presente estudio se encontró que tanto el SG como la GD no fueron correlacionados con ninguno de los parámetros energéticos evaluados (Tabla 5). Este resultado sugiere que los parámetros energéticos de las especies de reforestación estudiadas están influenciados por otras características de la madera.

El contenido de cenizas en la madera es una característica importante que afecta la capacidad de combustión. Una alta cantidad de cenizas en madera la hace menos deseable como combustible [30,37-39]. El análisis de correlación confirmó este comportamiento (Tabla 5), el porcentaje de cenizas fue negativamente significativo sobre el CV máximo y en el CV verde, cuando el duramente está presente en los árboles. Pero en el caso de que los árboles produzcan solo albura el efecto del contenido de cenizas desaparece en el CV máximo (Tabla 4), probablemente por la carencia de extractivos en este tipo de madera.

En el análisis de los efectos de la composición química sobre las propiedades energéticas de las especies estudiadas se encontró poca congruencia entre los efectos sobre la madera de albura y la de duramen (Tabla 5). Kumar et al [39] señala que existe relación entre el porcentaje de C y el CV máximo de una especie, sin embargo dicha relación solamente fue comprobada en la madera de duramen y no en la albura. Así mismo el contenido de C no presentó efectos en el CV verde en ambos tipos de madera (Tabla 4). Los resultados anteriores indican que el C presente en los extractivos produce estos efectos en el CV máximo del duramen, en el caso del CV verde el efecto del C pasa a un segundo plano, probablemente influenciado por la humedad de la madera.

Se ha señalado que la celulosa posee un contenido de calor relativamente bajo, debido a sus altos niveles de oxidación, mientras que la lignina posee bajos niveles de oxidación y por lo tanto un alto contenido de calor para combustión [40]. Sin embargo, en el estudio de las especies de rápido crecimiento de Costa Rica fue encontrado que solamente la lignina fue positivamente relacionada con CV verde y el FVI de las especies con duramen y que la celulosa no presentó ningún tipo de efecto con el CV (Tabla 5). Por tanto, otros factores, como los extractivos solubles en solventes orgánicos e inorgánicos pueden estar influyendo en el CV y disminuir los efectos de la celulosa o lignina.

En general se ha señalado que los extractivos aumentan la capacidad de combustión de la biomasa [32,41,42]. Sin embargo, en el presente estudio se encontró que los parámetros de combustión fueron poco afectados por la presencia de extractivos. En el caso del duramen, el CV verde se vio afectado positivamente por los extractos en diclorometano, pero negativamente en NaOH (Tabla 5). En la albura, los extractos en etanol-tolueno afectaron negativamente el CV máximo. Al respecto Senelwa and Sims [35] señalan que la falta de correlación entre extractivos y algunos parámetros energéticos (CV and FVI) puede ser debido a la nature of the components and the relative quantities present in the fuel. Some extractives contain terpenoid hydrocarbons and lipids while others contain phenolic compounds with higher oxidation levels than the former compounds. Hydrophilic compounds may include mono-saccharides and oligosaccharides, sugar alcohols, protein and mineral salts. Since combustion is an oxidation reaction and the heat of combustion of an organic compound is related to its level of oxidation or state of reduction, organic compounds containing only carbon and hydrogen produce more energy when burned than do those containing oxygen.

En relación al FVI, que es uno de los mejores parámetros para comparar entre especies [19], la variación encontrada de 348 a 6390 (Figura 1b) nuevamente coincide con valores reportados por otros autores [29,37,43]. Así mismo, un aspecto importante de destacar es que *C. lusitanica*, una especie softwood, presenta el valor estadísticamente más alto. Al respecto

White [32], menciona que las especies coníferas presentan un mayor potencial calórico debido a la alta presencia de resinas y extractivos. Específicamente fue comprobado que *C. lusitanica* presenta un alto contenido de C, lignina y alto contenido de extractivos en diclorometano y el análisis de correlación mostró que dichas características químicas están positivamente correlacionadas con la FVI (Tabla 5). De modo contrario, *B. quinata* y *V. guatemalensis*, especies que poseen altos porcentajes de cenizas, lo que origina que dichas especies sean de bajo FVI y por tanto de menor potencial energético. En tanto que el resto de especies poseen valores intermedios de FVI, lo cual las hace especies que poseen mejores cualidades como combustibles y podrían ser consideradas en plantaciones energéticas.

La figura 2 muestra claramente el efecto lineal ($y = \beta_0 + \beta_1 \text{MCg}$) del MCg sobre el CV, donde se observan claramente los beneficios que posee el secado de la biomasa antes de su combustión. Así mismo esto coincide con otros estudios llevados a cabo en *Pinus radiata* and *Eucalyptus nites* [35]. La humedad no contribuye al CV, pero reduce el calor disponible para combustión, al respecto [35] señalan 3 aspectos importantes: (i) reduce el CV inicial de la madera, (ii) reduce la eficiencia de la combustión ya que el calor se absorbe en la evaporación de agua en las etapas iniciales de combustión, lo que reduce tanto la temperatura de la llama como la transferencia de calor y (iii) por el efecto de hidrólisis en el agua caliente.

Los diferentes gradientes (β_0) en los modelos de variación del poder calórico con la disminución del MC encontrados entre la albura y el duramen en las especies con estos dos tipos de madera (*C. lusitanica* and *S. macrophylla* el gradiente de la pendientes es mayor en el duramen, pero en *A. mangium* and *T. grandis* la pérdida de calor es mayor en la albura, en tanto que *G. arborea* no hay diferencia en los dos tipos de tejidos), indican que la influencia del MC en el poder calórico es diferente en cada tipo de madera, por lo que probablemente diferentes mecanismos durante la combustión están ocurriendo o bien los extractivos de la madera están influyendo en esta variación. De hecho, los efectos de los componentes químicos o extractos en la madera afectaron de diferente forma los dos tipos de madera. En el caso del duramen, la gradiente de la pendiente (β_0) fue afectado solamente por los extractos en agua caliente, diclorometano y etanol-tolueno, pero en el caso de la albura solamente fue afectado significativamente por el porcentaje de cenizas (Tabla 5).

Las diferentes especies, como sucedió en la albura y duramen, también presentaron diferentes gradientes (β_0) en los modelos de variación del poder calórico con la disminución del MC en la parte de la albura. Confirmando nuevamente que la influencia del MCg sobre el CV es diferente para cada especie, por lo que diferentes mecanismos durante la combustión están ocurriendo producto de los constituyentes químicos o extractivos en la madera. En el caso de la albura, presente en todas las especies, el CV verde fue afectado negativamente por el contenido de cenizas (Tabla 4). Para la albura, las especies *B. quinata*, *G. arborea*, *T. oblonga* y *V. guatemalensis*, con la característica de presentar alto contenido de cenizas, produjeron los gradientes más bajos (de -182 a -194), en tanto que un grupo de especies conformado por *C. lusitanica*, *S. macrophylla* y *T. amazonia*, con bajos niveles de cenizas (Tabla 3) presentaron los gradientes más altos (de -109 a -123). Dichos resultados muestran el efecto negativamente significativo encontrado del contenido de cenizas y los gradientes de cambio del poder calórico con la disminución del MCg (Tabla 5).

5. Conclusiones

Los parámetros energéticos presentaron variaciones entre las especies de rápido crecimiento en plantaciones. La única conífera (*C. lusitanica*), presente de las 10 especies estudiadas, fue

la especie con mayor potencial energético debido a sus altos valores de FVI, CV y sus bajos contenidos de cenizas. No obstante, las otras especies de plantación a pesar de que no presentan los valores energéticos de *C. lusitanica*, poseen un potencial energético importante debido a los altos volúmenes de desechos o residuos que se obtienen en las distintas industrias.

El CV (máximo y verde) y el FVI fueron afectados por los parámetros químicos y por la cantidad de extractivos que presenta la madera. En las especies que presentaron duramen fue encontrado que el contenido de C y la cantidad de cenizas afectaron negativamente el CV máximo, y la cantidad de N, lignina y los extraíbles en diclorometano afectaron positivamente el CV verde, en tanto que la cantidad de cenizas afecto negativamente el CV verde. En la madera de albura el CV fue menos afectado, la cantidad de extraíbles en etanol-tolueno afecto significativamente el CV máximo y la cantidad de cenizas afectó el CV verde. El FVI fue afectado por la cantidad de C y de lignina, y por los extraíbles en NaOH y diclorometano.

Como era de esperar el MC presentó un efecto lineal sobre el CV de la madera, sin embargo, la influencia del MCg en el CV es diferente para cada especie o tipo de madera (duramen o albura). Esto sugiere que diferentes mecanismos durante la combustión están ocurriendo, como la influencia de los extractivos de la madera. En el caso del duramen, la gradiente de la pendiente (β_0) fue afectada solamente por la lignina y por los extraíbles en NaOH y diclorometano, pero en el caso de la albura solamente fue afectada significativamente por el porcentaje de cenizas.

References

- [1] Moya R. Wood of *Gmelina arborea* in Costa Rica. New For 2004; 28: 299-317
- [2] Murillo O, Obando G, Badilla J, Sánchez S. Perspectivas en las zonas altas de Costa Rica. Biocenosis 2001; 15(1-2): 66-71.
- [3] Pérez D, Kanninen M. Stand growth scenarios for *Bombacopsis quinata* plantations in Costa Rica. Forests Ecol Manag 2001; 177: 427-39.
- [4] Petit B, Montagnini F. Growth equations and rotation ages of ten native tree species in mixed and pure plantations in the humid neotropics. Forests Ecol Manag 2004; 199: 243-57.
- [5] González E, Fisher R. Variation in selected wood properties of *Vochysia guatemalensis* from four sites in Costa Rica. For. Sci. 1998; 44: 185-91.
- [6] Piotta D, Montagnini F, Ugalde L, Kanninen M. Performance of forest plantations in small and medium sized farms in the Atlantic lowlands of Costa Rica. Forest Ecol. Manag 2003; 175: 195-204.
- [7] Alice F, Montagnini F, Montero M. Productividad en plantaciones puras y mixtas de especies forestales nativas en la Estación Biológica La Selva, Sarapiquí, Costa Rica. Agronomía Costarricense 2004; 28(2): 61-71.
- [8] Pang S, Xu Q. Drying of woody biomass for bioenergy using packed moving bed dryer: mathematical modeling and optimization. Drying Tech 2010; 28:702-09.
- [9] Pang S, Li J. BIGCC (biomass integrated gasification combined cycle) system for New Zealand: An overview and perspective. New Zeal J For 2006; 51(2): 7–12.
- [10] Velázquez B. Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. Ecosistemas 2006; 15: 77-86 (in Spanish with abstract in English)
- [11] Andersen R, Towers W, Smith P. Assessing the potential for biomass energy to contribute to Scotland's renewable energy needs. Biomass Bioenerg 2005; 29(2): 73-82.

- [12] Offerman R, Seidenberger T, Thrän D, Kaltschmitt M, Zinoviev S, Miertus S. Assessment of global bioenergy potentials. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 2011; 16: 103-15.
- [13] Mckendry P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technol* 2002; 83(1): 37-46
- [14] Ulloa JB, Weerd JH, Huisman EA, Verreth JAJ. Tropical agricultural residues and their potential uses in fish feeds: The Costa Rica situation. *Waste Manag* 2004; 24: 87-97.
- [15] Reuter, MA. Limits of design for recycling and “Sustainability”: A Review. *Waste Biomass Valor* 2011; 2: 183-208.
- [16] Fuwapi JA. Gross heat of combustion of *Gmelina* (*Gmelina arborea* (Roxb.)) chemical components. *Biomass* 1989; 19: 281-7.
- [17] Sjöström, E. Wood chemistry, fundamentals and applications, Second Edition. Academic Press, New York, 2003.
- [18] ASTM. American Society for Testing and Materials. D 5865-04 Standard test method for gross calorific value of coal and coke. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 04.10. 2003a.
- [19] Purohit AN, Nautiyal AR. Fuelwood value index of Indian mountain tree species. *Int Tree Crops J* 1987; 4: 177-82.
- [20] ASTM. American Society for Testing and Materials. D 4442-92 Standard test methods for direct moisture content measurements of wood and wood-based materials. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 04.10. 2003b.
- [21] ASTM. American Society for Testing and Materials. D 143-94 Standard test methods for small clear specimens of timber. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 04.10. 2003c.
- [22] ASTM. American Society for Testing and Materials. D-1102-84 Standard test method for ash in wood. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 2003d.
- [23] TAPPI. Technical Association of the Pulp and Paper Industry, US. Tappi T 222 om-02 revised 2002. Standard test for acid-insoluble lignin in wood and pulp. Parkway South Norcross, US, TAPPI. 2002.
- [24] Seifert, K. Zur frage der Cellulose-Schnellbestimmung nach der Acetylaceton-Methode. *Das Papier* 1960; 14: 104-06.
- [25] ASTM. American Society for Testing and Materials. D-1110-84 Standard test method for water solubility of wood. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 2003e.
- [26] ASTM. American Society for Testing and Materials. D-1109-84 Standard test method for 1% sodium hydroxide solubility of wood. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 2003f.
- [27] ASTM. American Society for Testing and Materials. D-1107-84 Standard test method for ethanol-toluene solubility of wood. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 2003g.
- [28] ASTM. American Society for Testing and Materials. D-1108-96 Standard test method for dichloromethane solubles in wood. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 2003h.
- [29] Kumar JIN, Patel K, Kumar RN, Kumar R. An evaluation of fuelwood properties of some aravally mountain tree and shrub species of Western India. *Biomass Bioenerg* 2011; 35: 411-14.
- [30] Katak R, Konwer D. Fuelwood characteristics of indigenous tree species of north-east India. *Biomass Bioenerg* 2002; 22: 433-37.

- [31] Shanavas A, Kumar M. Fuelwood characteristics of tree species in homegardens of Kerala, India. *Agroforest Syst* 2003; 58: 11-24.
- [32] White RH. Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. *Wood Fiber Sci* 1987; 19(4): 446-52.
- [33] Singh B, Khanduja SD. Wood properties of some firewood shrubs of northern India. *Biomass* 1984; 4: 235-8.
- [34] Goel VL, Behl HN. Fuelwood quality of promising tree species for alkaline soil sites in relation to tree age. *Biomass Bioenerg* 1996; 10(1):57-61.
- [35] Senelwa K, Sims REH. Fuel characteristics of short rotation forest biomass. *Biomass Bioenerg* 1999; 17:127-40.
- [36] Jain RK. Fuelwood characteristics of some tropical trees of India. *Biomass Bioenerg* 1993; 4(6): 461-64.
- [37] Jain RK, Singh B. Fuelwood characteristics of selected indigenous tree species from central India. *Bioresource Techn* 1999; 68(3): 305-08.
- [38] Kumar R, Pandey KK, Chandrashekar N, Mohan S. Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus* hybrid. *J Forest Res* 2010; 21: 514-16.
- [39] Kumar JIN, Patel K, Kumar RN, Kumar R. An assessment of Indian fuelwood with regards to properties and environmental impact. *Asian J Energ Env* 2009; 10: 99-107.
- [40] Kumar M, Gupta RC, Sharma T. Effect of carbonization conditions on the yield and chemical composition of *Acacia* and *Eucalyptus* wood chars. *Biomass Bioenerg* 1992; 3: 411-17.
- [41] Demirbas, A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. *Energ Explor Exploit* 2009; 20: 105-11
- [42] Demirbas C, Demirbas T. Fuel properties of wood species. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 2009; 31: 1464-72.
- [43] Katakki R, Konwer D. Fuelwood characteristics of some indigenous woody species of north-east India. *Biomass Bioenerg* 2001; 20(1): 17-23.

ANEXO 2: Tenorio, C; Moya, R. 2012. Evaluación de la madera de plantaciones de rápido crecimiento como combustible y efectos de las características químicas y extraíbles sobre las características de calóricas. Nota técnica, Revista Forestal Mesoamericana Kuru. (Sometido)

Evaluación de la madera de plantaciones de rápido crecimiento como combustible y efectos de las características químicas y extraíbles sobre las características de calóricas

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue investigar las características de la madera como combustible (poder calórico e índice de combustibilidad) de 10 especies de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. Fue evaluado el efecto de las propiedades químicas y del contenido humedad sobre estas. Los resultados mostraron que el poder calórico máximo varió de 16500 a 20594 kJ/kg para la albura y de 16258 a 20119 kJ/kg para el duramen. No se presentó una consistencia con respecto a cual tipo de madera (albura o duramen) presenta el mayor o menor valor de poder calórico. En el caso del índice de combustibilidad, se presentan grandes variaciones. Al evaluar los efectos de la humedad se encontró un efecto lineal sobre el poder calórico, sin embargo la influencia de la humedad en el poder calórico es diferente para cada especie o tipo de madera (duramen o albura). La única conífera (*C. lusitanica*), presente de las 10 especies estudiadas, fue la especie con mayor potencial energético debido a sus altos valores de índice de combustibilidad, poder calórico y sus bajos contenidos de cenizas. Las otras especies de plantación a pesar de que no presentan los valores energéticos de *C. lusitanica*, poseen un potencial energético importante debido a los altos volúmenes de desechos o residuos que se obtienen en las distintas industrias.

Palabras claves: *poder calórico, índice de combustibilidad, contenido de humedad, albura, duramen.*

1. INTRODUCCION

Costa Rica es un país pequeño, que ha introducido gran variedad de especies para la reforestación, orientadas principalmente a la producción de madera aserrada (Moya 2004a). Sin embargo, solo unas pocas especies nativas y exóticas han adquirido importancia comercial en diversos proyectos de reforestación debido principalmente al conocimiento limitado de sus procesos genéticos, reproductivos y de manejo (Murillo et al, 2001).

Especies de relativo rápido crecimiento (con períodos de rotación de menos de 25 años), como *Terminalia amazonia*, *Terminalia oblonga*, *Vochysia guatemalensis*, *Bombacopsis quinata*, *Alnus acuminata*, y *Swietenia macrophylla* (especies nativas) y *Tectona grandis*, *Cupressus lusitanica*, *Acacia mangium* y *Gmelina arborea* (especies exóticas), han demostrado excelentes resultados como especies de reforestación en plantaciones forestales en Costa Rica (Murillo et al 2001, Pérez y Kanninen 2001, Petit y Montagnini 2004, Moya 2004a). Debido no solo por la calidad de su madera y por su rápido crecimiento, sino debido a que poseen la capacidad de adaptarse en áreas abandonadas por otras actividades económicas, benefician la fertilidad del suelo y se pueden utilizar en sistemas agroforestales y plantaciones mixtas (González y Fisher 1994, Petit y Montagnini 2004, Piotto et al 2003, Alice et al 2004).

En los últimos años, con los problemas asociados al medio ambiente y al calentamiento global del planeta, amplias investigaciones se han llevado a cabo para encontrar fuentes de energía fiable y renovable para sustituir los combustibles fósiles. En los procesos de transformación y aserrío de la madera se genera una enorme cantidad de residuos que pueden ser usados como fuentes de energía renovables (Pang y Li, 2006, Velázquez, 2006; Andersen et al., 2005; Offerman et al., 2011). Sin embargo, es importante indicar que una de las limitantes más grandes a las que se enfrentan estos sectores es que en el caso de Costa Rica no se cuenta con un proceso industrial que verdaderamente haga utilización de dichos residuos (Ulloa et al., 2003). De forma tal que para el medio costarricense y para algunos países en vías de desarrollo, la utilización de estos residuos constituiría una alternativa novedosa en el uso secundario de este tipo de material.

No obstante, para verdaderamente dar una utilidad a los residuos forestales en fuentes de energía calórica es necesario conocer las propiedades de combustión de las especies utilizadas en reforestación. Por ejemplo se ha mencionado que el poder calórico neto de las maderas varía de 17600 a 18700 kJ por kg de materia seca. Sin embargo, este valor depende de muchos factores (Reuter, 2011), entre los que se destaca la humedad presente en el residuo, por lo que se ha establecido una forma general de calcular el poder calórico en los diferentes grados de humedad $PC_{CH} = PC_{máximo} (1 - CH \cdot 100^{-1})$, donde PC_{CH} representa el poder calórico al contenido de humedad deseado, $PC_{máximo}$ el poder calórico máximo (de 17600 a 18700 kJ por kg) y el contenido de humedad en base húmeda a la que se desea determinar.

Las maderas tropicales, por su parte, en general poseen proporciones diferentes de carbono, oxígeno e hidrógeno (Sjöström, 1993). Pero a pesar de esta diferencia, los valores de poder calórico, otros parámetros importantes en los valores energéticos y la influencia de otras características de las maderas han sido tomados de estudios realizados para especies de clima templados, lo cual puede traer consigo problemas en los cálculos energéticos en el momento de aprovechar las especies o la utilización de los residuos en los aserraderos.

En el caso de Costa Rica, con clima tropical, aunque actualmente se esté empezando a producir energía con residuos ligno-celulósicos a base de madera aún no se cuenta con la información de las características de combustión de las especies de mayor uso comercial, por lo que se requiere de investigaciones que determinen estos parámetros energéticos. De forma tal, que el presente estudio tiene como objetivo determinar los principales parámetros energéticos (poder calórico e índice de combustibilidad) de las 10 especies más utilizadas en plantaciones forestales en el país. Esta información ayudará a las industrias, reforestadoras y a otros entes a dar uso integral de la materia prima generada en las plantaciones.

2. METODOLOGÍA

2.1. Material utilizado y muestreo

Diez especies diferentes de plantaciones forestales de rápido crecimiento ubicadas en diferentes regiones de Costa Rica fueron utilizadas. El rango de edades de las plantaciones fue de 6 a 21 años. El cuadro 1, presenta la densidad y las condiciones dasométricas de las plantaciones. Tres árboles fueron seleccionados con un diámetro cercano al promedio de cada plantación. Los árboles muestreados presentaban buena forma y estaban libres de daños de ataques de insectos u hongos. De cada árbol fue cortada una troza de 1 metro, en la base del árbol y pintada en sus extremos con el fin de disminuir la pérdida de humedad.

Cuadro 1. Características dasométricas de las plantaciones utilizadas.

Especies	Edad (años)	Densidad (árboles/ha)	Altura total (m)	Diámetro a la altura de pecho (cm)
<i>Alnus acuminata</i>	11	338	20,99	27,90
<i>Acacia mangium</i>	6	800	11,89	17,87
<i>Bombacopsis quinata</i>	14	265	22,58	36,99
<i>Cupressus lusitanica</i>	18	400	17,60	33,65
<i>Gmelina arborea</i>	6	1000	15,90	20,60
<i>Swietenia macrophylla</i>	21	21	9,49	18,15
<i>Tectona grandis</i>	9	509	14,99	20,50
<i>Terminalia amazonia</i>	12	378	18,54	21,48
<i>Terminalia oblonga</i>	20	221	14,35	23,48
<i>Vochysia guatemalensis</i>	10	641	21,83	23,07

2.2. Obtención de muestras

De cada troza de 1 m, fueron cortadas secciones transversales de aproximadamente de 5 cm. Seguidamente cada sección transversal fue cortada por la mitad, y luego fueron extraídas 5 astillas de aproximadamente 6 cm de ancho y de 1 cm de espesor. Dichas astillas fueron utilizadas para determinar el contenido de humedad (CHg), el peso específico (PE) y la densidad en condición verde (DV). La cantidad total de astillas fue de 135.

La determinación del poder calórico (PC), el porcentaje de cenizas, el porcentaje de carbono (C), nitrógeno (N) y la relación carbono/nitrógeno se realizó a través de la extracción de aserrín, resultante del proceso de aserrío de las trozas de cada una de las especies, dicho aserrín fue tamizado en mallas de 0,25 mm y 0,42 mm, hasta obtener aproximadamente 8 gramos para cada prueba.

2.3. Características de combustión

El porcentaje de Carbono (C), Nitrógeno (N) y la relación C/N fueron determinados mediante el uso del Elementar Analysensysteme, modelo Vario Macro Cube. También fue determinado el índice de combustibilidad (IC) que toma como referencia el poder calórico neto, la densidad y el porcentaje de cenizas, utilizando la ecuación 1, basados en la metodología propuesta por Purohit y Nautiyal (1987).

$$\text{Índice combustibilidad} = \frac{(\text{Poder calórico} * \text{Densidad})}{\text{Porcentaje cenizas} * 100} \quad (1)$$

2.4. Determinación del poder calórico

El poder calórico (PC) fue determinado para la variación del contenido de humedad desde condición verde hasta la condición sin presencia de agua. Se utilizó el aserrín tamizado de entre 0,25 mm y 0,42 mm y fue seleccionado el tamaño de partículas

colectadas entre la malla de 40 y 60. Se obtuvo aproximadamente 100 gramos de material tamizado. Luego este material fue esparcido sobre una superficie plana para que se fuera secando a temperatura ambiente, período que tardo en promedio alrededor de 15 horas para todas las especies. Durante este período, cada 30 minutos fueron extraídos aproximadamente 8 gramos de muestras, con el fin de obtener material para los diferentes contenidos de humedad y así tener la variación del PC con el contenido de humedad. Posteriormente, las muestras fueron divididas en dos partes: 1 gramo para la determinación del contenido de humedad y tres muestras de 2 gramos para la determinación del PC. El PC se basa en la determinación de la cantidad de energía total que un material orgánico emite, en este caso se determinó usando la prueba calorimétrica de Parr's mediante la norma ASTM D-5865 (ASTM, 2003a).

2.5. Determinación del contenido de humedad en verde, peso específico y densidad

El cálculo del contenido de humedad (CHg) está referido a la humedad que presenta la madera en el momento del corte, comúnmente denominado como humedad en verde. Las astillas fueron pesadas en el momento del corte y fueron colocadas por 24 horas en un horno de circulación de aire forzado a una temperatura de 103 °C, acorde con la norma ASTM D-4442 (ASTM, 2003b). Luego de ese período se volvía a pesar, para obtener el peso seco. Finalmente se aplicó la ecuación 2. En la determinación del peso específico básico (PE) y la densidad verde (DV). El volumen de la astilla fue determinado por desplazamiento de volumen de agua sobre una balanza. Para el PE (peso seco/volumen verde) se utilizó la norma ASTM-143 (ASTM, 2003c). Y para la DV se utilizó la relación peso verde/volumen verde.

$$CHg = \frac{(\text{Peso verde} - \text{Peso seco})}{\text{Peso verde}} \times 100 \quad (2)$$

2.6. Determinación de las propiedades químicas

Estas consistieron de determinar el contenido de cenizas, la cantidad de celulosa y lignina. En la determinación de la cantidad de cenizas se siguió la norma ASTM D-1102-84 (ASTM, 2003d), en la cuantificación de lignina se utilizó el método TAPPI T222 om-02 (Tappi, 2002) y en la determinación de celulosa se siguió el procedimiento seguido por Seifert (1960). En cada tipo de determinación se utilizaron 3 muestras diferentes.

2.7. Análisis estadísticos

Se desarrollo un análisis descriptivo (media, desviación estándar, valores máximos y mínimos) para todas las variables de respuesta. Además, se verificó si las variables cumplían con la los supuestos de la distribución normal, homogeneidad de las varianzas, así como la presencia de datos extremos. El procedimiento GLM de SAS (SAS Institute 1997) fue aplicado para estimar la significancia de las fuentes de variación. La existencia de diferencias significativas entre los promedios del poder calórico máximo y del poder calórico verde, del contenido de humedad, el peso específico, la densidad verde, el contenido de cenizas, carbono, nitrógeno, la relación C/N, lignina y celulosa fue verificada mediante la prueba de Tukey ($P < 0.05$). Se realizó un análisis de regresión lineal del tipo $PC = \beta_0 + \beta_1 \text{CHg}$ en orden de establecer la relación entre el contenido de humedad y el poder calórico.

3. RESULTADOS

3.1. Parámetros calorimétricos

Los parámetros energéticos son mostrados en la figura 1. En el caso del PC máximo (PC a 0% de CH) los valores variaron de 16500 a 20594 kJ/kg para la albura y de 16258 a 20119 kJ/kg para el duramen (Figura 1a). *B. quinata*, *A. mangium*, *G. arborea* y *A. acuminata* presenta los valores más altos en albura, del mismo modo *G. arborea* y *S. macrophylla* del duramen. En las especies que se presentan albura y duramen no hay una consistencia en cual tipo de madera presenta mayor PC. *A. mangium* y *T. grandis* la albura presenta mayor PC que la madera de duramen. Por el contrario, *C. lusitanica* y *S. macrophylla*, el duramen presenta PC que la madera de albura, En tanto que en *G. arborea* no se presenta diferencia en los dos tipos de madera (Figura 1). En el caso del índice de combustibilidad (IC), se presentan grandes variaciones de las especies (Figura 1b). *C. lusitanica* (6390) posee un valor muy superior al resto de las especies. Posteriormente se presenta un grupo de especies con valores próximos a 3000, compuesta por *T. amazonia*, *S. macrophylla*, *A. mangium*, *A. acuminata* y *T. grandis*. Finalmente, 4 especies (*G. arborea*, *T. oblonga*, *V. guatemalensis* y *B. quinata*) presentan IC bajos.

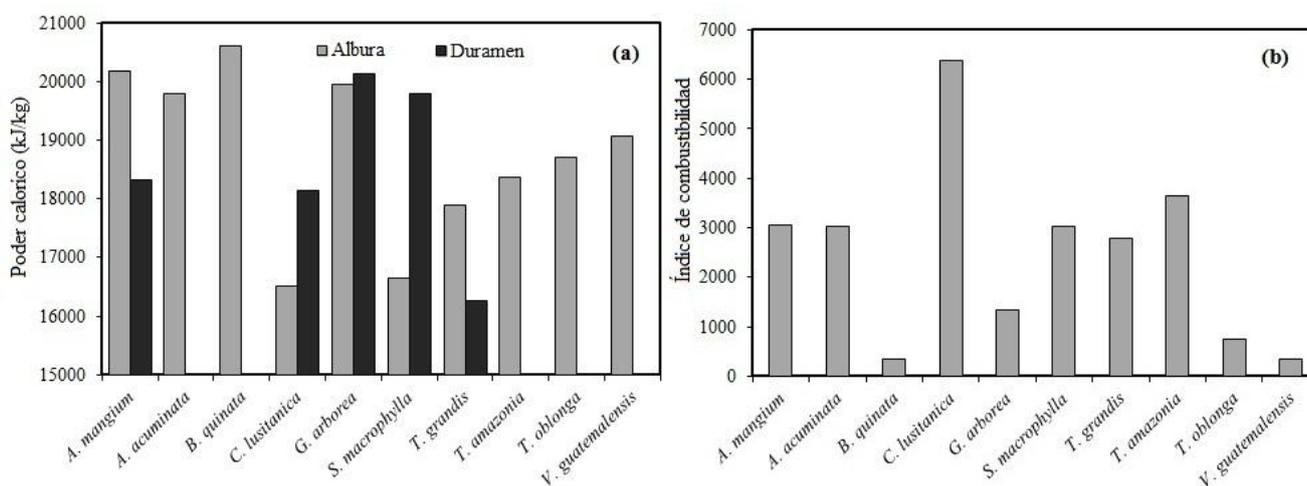


Figura 1. Poder calórico a 0% de contenido de humedad (a), índice de combustibilidad (b) para 10 especies de rápido crecimiento en Costa Rica.

3.2. Variación del poder calórico con el contenido de humedad

La figura 2, muestra el comportamiento del PC por la variación del CHg en las 10 especies, tanto para albura como para duramen, en las especies que poseen ambos tipos de madera. Como era de esperar el comportamiento del PC fue inversamente proporcional con el incremento del CHg. En las especies que presentan tanto madera de albura como de duramen no hay una tendencia clara para decir que un tipo de madera presenta mayor PC que otro. En *C. lusitanica*, *S. macrophylla* y *G. arborea* se observa que la madera de duramen posee valores de PC más altos en comparación con la madera de albura (Figuras 2d, e, f). *A. mangium* tiene un comportamiento similar, pero en CHg menores a 10%, la albura posee valores de PC mayores al duramen (Figura 2a). El caso de *T. grandis* es contrario a los anteriores, el duramen posee valores de PC más bajos que la albura (Figura 2g).

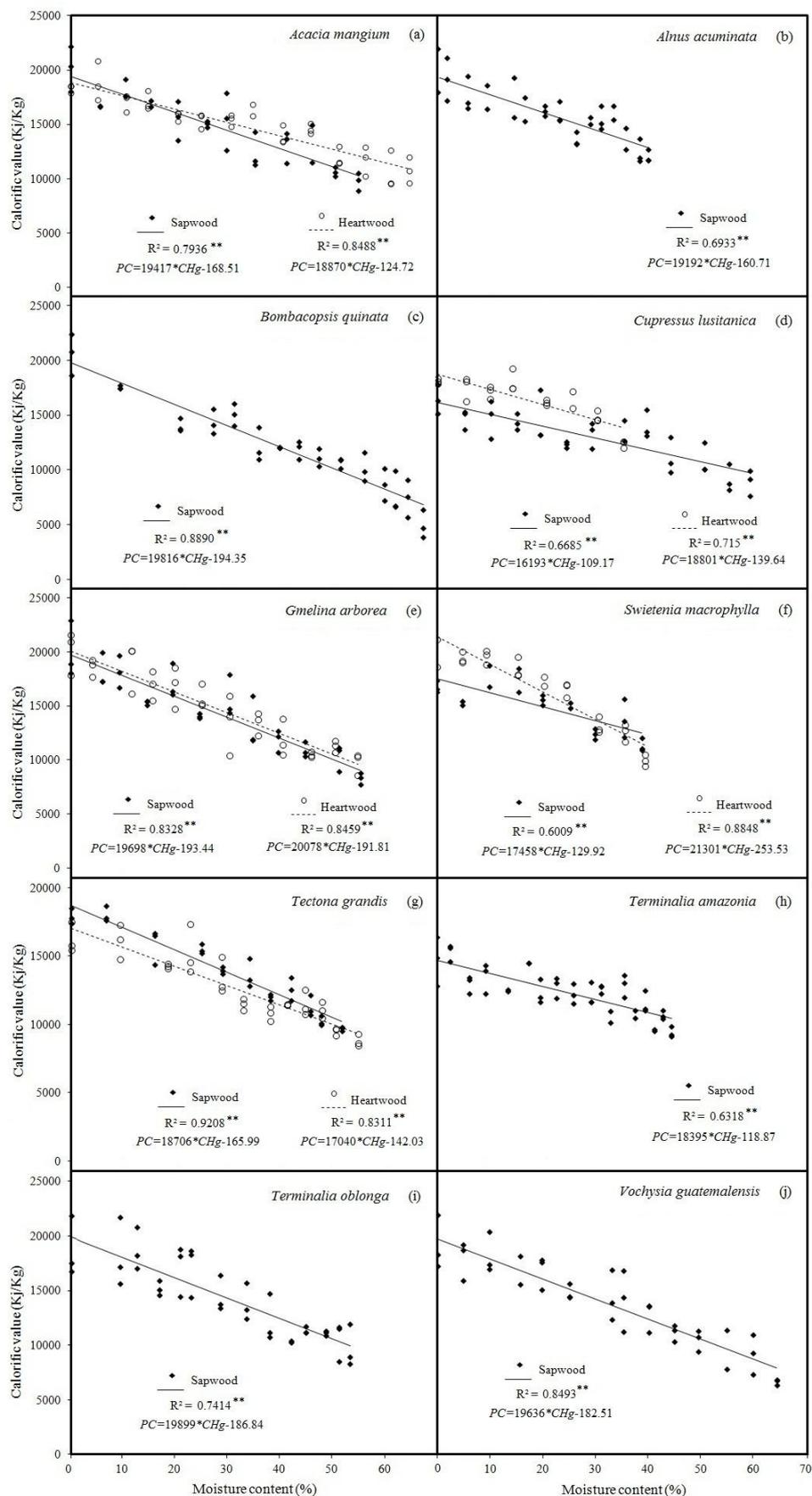


Figura 2. Poder calórico de acuerdo con el contenido de humedad para 10 especies de rápido crecimiento en Costa Rica.

Para las 10 especies, se encontró que el poder calórico puede ser modelado con respecto a la disminución del MCg por una relación lineal de tipo $PC = \beta_0 \cdot CHg + \beta_1$. En la figura 2, se muestran los diferentes coeficientes del modelo, los coeficientes de determinación (R^2). Los R^2 más bajos se encontraron en la madera de albura de *T. amazonia* (0.63), *C. lusitanica* (0.67) y *A. acuminata* (0.69). La albura de *T. grandis* presenta el R^2 más alto con 0.92, seguida de *B. quinata* con 0.89. El intercepto de las ecuaciones (β_0), en este modelo representa el valor estimado del PC a un CHg de 0% y sus valores varían de 17040 a 21301 kJ/kg en el duramen, y de 16194 a 19899 kJ/kg en la albura. En este caso *S. macrophylla* y *G. arborea* presentan los valores más altos, con 21301 y 20078 kJ/kg, respectivamente ambas en el duramen. Los valores más bajos los presenta la albura de *C. lusitanica* (16194 kJ/kg) y el duramen de *T. grandis* (17040 kJ/kg). La pendiente de la ecuación representa como cambia el PC según el cambio de 1% en el CHg. Un valor negativo significa que la relación existente entre el PC y el CHg es negativa o inversa. *S. macrophylla* (-253.53 kJ/% CHg) es la especie que pierde mayor PC conforme aumenta en 1% en CHg. Por el contrario *C. lusitanica* es la especie que menos PC pierde al aumentar el CHg, con -109.17 kJ/% CHg. El resto de las especies se encuentran en el rango de -194.35 a -118.87 kJ/% CHg.

3.3. Propiedades físicas y químicas

Las propiedades físicas y químicas obtenidas para las 10 especies son mostradas en la cuadro 2. En relación a las propiedades físicas se encontró que: (i) la variación de la densidad verde (DV) fue de 0.67 a 1.12 g/cm³ y este rango se puede separar en especies con densidades sin diferencia estadística. Un primer grupo, con DV mayor a 1 g/cm³ es compuesto por *T. grandis* y *A. mangium*. Un segundo grupo compuesto por especies con valores estadísticamente menores al primer grupo, de 0.91 a 0.95 g/cm³, compuesto por *G. arborea*, *S. macrophylla* y *T. oblonga*. El tercer grupo lo componen *T. amazonia* y *B. quinata*, con 0.87 y 0.86 g/cm³ respectivamente. *C. lusitanica* y *V. guatemalensis* componen el cuarto grupo ambas con 0.75 g/cm³. Finalmente *A. acuminata* con 0.67 g/cm³, valor estadísticamente diferente a todos los anteriores. (ii) En la PE se presentó una variación de 0.26 a 0.60. El análisis de medias mostró que solamente en *A. mangium* (0.37) y *A. acuminata* (0.36) los valores no presentaron diferencias estadísticas. A diferencia del resto de la especies que se presentó valores de PE estadísticamente diferentes (valor p < 0.05) entre ellos (Cuadro 2). (iii) En el CHg, se encontró en el análisis estadístico que los valores más altos se presentaron en *A. mangium* y *V. guatemalensis* y la especie con menor CHg se presentó *T. oblonga*. Seguidamente *G. arborea* y *T. grandis* presentaron CHg con valores intermedios (entre 41.81% y 63.34%) y luego de ellas, con valores de CHg estadísticamente menores *S. macrophylla* y *T. amazonia*. En tanto que el resto de las especies son diferentes entre ellas y con los grupos anteriores.

En tanto que en la composición química se determinó que: (i) *B. quinata* y *V. guatemalensis* presentan los porcentajes de cenizas más altos, pero con diferencias estadísticas entre ellos, mientras que *C. lusitanica*, *A. acuminata* y *T. amazonia* (0.41%) presentan los valores estadísticamente más bajos. El resto de las especies presentan diferencias estadísticas entre ellas, con valores que van de 0.58% a 2.81% (ii) En relación con el porcentaje de C se encontró que *C. lusitanica* y *T. grandis* presentan los porcentajes más altos, posteriormente, y con menor contenido de C, se presentan 4 especies (*A. mangium*, *B. quinata*, *G. arborea* y *S. macrophylla*). Seguidamente *T. amazonia*, *A. acuminata* y *T. oblonga*, forman un tercer grupo. Finalmente *V. guatemalensis* presenta el contenido de C más bajo y es estadísticamente diferente al resto de las especies (Cuadro 2). (iii) El porcentaje de N, fue el parámetro donde se presentaron la menor cantidad diferencias estadísticas entre especies (Cuadro 2). Un grupo con valores entre 0,27% a 0,34%, lo conforman *V. guatemalensis*, *T. oblonga*, *A.*

acuminata, *C. lusitanica* y *T. amazonia*. Otro grupo, con contenidos de N menores a 0,26%, es formado por *B. quinata* y *S. macrophylla*. Finalmente *G. arborea* y *T. grandis*, presentan los porcentajes estadísticamente más bajos de N con 0.20%. (iv) La relación C/N presenta valores que varían de 138.49 a 249.79. Las especies se concentraron en 2 grupos, el primer grupo corresponde a las especies de valores más altos de 185.56 a 249.79 que incluye a *G. arborea*, *T. grandis*, *S. macrophylla*, *B. quinata* y *C. lusitanica* y un segundo grupo va de 138.49 a 185.56 que incluye al resto de las especies. (v) El porcentaje de celulosa varió de 40.07% a 49.58%. El análisis estadístico mostro que *B. quinata*, *A. mangium* y *G. arborea* son las especies con los porcentajes de celulosa mayores a 47.41%. Un segundo grupo con valores que van de 43.83% a 46.00% es compuesto por las especies *V. guatemalensis*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *C. lusitanica*. *A. acuminata*, *S. macrophylla* y *T. oblonga*, presentan los valores estadísticamente más bajos entre 40.07% a 43.19%. (vi) Finalmente, el contenido de lignina presentó valores que van de 21.95% a 48.39% (Cuadro 2). *V. guatemalensis* y *C. lusitanica* presentaron los valores estadísticamente más altos con 48.39% y 46.77% respectivamente. Un segundo grupo de especies compuesto por *B. quinata* y *T. oblonga* presentaron un contenido de lignina de 39.92% y 38.31%, seguidas de *A. acuminata*, *A. mangium*, *T. amazonia* y *S. macrophylla* con valores que varían de 30.96% a 33.01%. Finalmente, los porcentajes estadísticamente más bajos son para *T. grandis* con 21.95% y *G. arborea* con 24.20%.

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas para 10 especies de rápido crecimiento en plantaciones forestales en Costa Rica.

Especie	Densidad verde (g/cm ³)	Peso específico básico	Contenido de humedad verde (%)	Cenizas (%)	Carbono (%)	Nitrógeno (%)	Relación Carbono-Nitrógeno	Celulosa (%)	Lignina (%)
<i>Acacia mangium</i>	1.08 ^B (0.04)	0.37 ^G (0.06)	66.72 ^A (4.89)	0.58 ^{EF} (0.09)	48.48 ^B (0.12)	0.28 ^{AB} (0.04)	175.20 ^B (24.03)	49.31 ^{AB} (2.00)	31.43 ^D (3.80)
<i>Alnus acuminata</i>	0.67 ^G (0.07)	0.36 ^G (0.04)	46.48 ^D (1.79)	0.38 ^{FG} (0.06)	47.74 ^C (0.09)	0.30 ^{AB} (0.01)	159.70 ^B (8.04)	43.19 ^{DE} (1.37)	33.01 ^{CD} (1.79)
<i>Bombacopsis quinata</i>	0.86 ^E (0.05)	0.32 ^H (0.04)	63.34 ^B (4.45)	3.99 ^A (0.51)	48.68 ^B (0.10)	0.26 ^{BC} (0.02)	187.97 ^{AB} (14.40)	49.58 ^A (3.80)	39.92 ^B (1.44)
<i>Cupressus lusitanica</i>	0.75 ^F (0.07)	0.42 ^E (0.04)	44.50 ^E (7.31)	0.19 ^G (0.04)	50.18 ^A (0.21)	0.27 ^{ABC} (0.01)	185.56 ^{AB} (10.25)	46.00 ^{BCD} (1.53)	46.77 ^A (1.76)
<i>Gmelina arborea</i>	0.91 ^D (0.14)	0.39 ^F (0.04)	56.97 ^C (5.90)	0.96 ^E (0.08)	48.39 ^B (0.14)	0.20 ^C (0.05)	249.79 ^A (74.39)	47.41 ^{ABC} (1.48)	24.20 ^E (1.66)
<i>Swietenia macrophylla</i>	0.94 ^{CD} (0.04)	0.54 ^B (0.03)	41.81 ^F (2.73)	0.64 ^{EF} (0.04)	48.75 ^B (0.25)	0.24 ^{BC} (0.00)	199.53 ^{AB} (3.09)	43.15 ^{DE} (0.88)	30.96 ^D (2.28)
<i>Tectona grandis</i>	1.12 ^A (0.02)	0.49 ^D (0.04)	56.43 ^C (3.82)	2.81 ^C (0.13)	49.77 ^A (0.15)	0.20 ^C (0.01)	249.11 ^A (16.21)	44.45 ^{CD} (0.78)	21.95 ^E (2.58)
<i>Terminalia amazonia</i>	0.87 ^E (0.08)	0.51 ^C (0.04)	41.66 ^F (2.07)	0.41 ^{FG} (0.07)	47.83 ^C (0.18)	0.27 ^{ABC} (0.02)	176.84 ^B (10.98)	45.81 ^{BCD} (1.64)	31.36 ^D (1.20)
<i>Terminalia oblonga</i>	0.95 ^C (0.07)	0.60 ^A (0.07)	37.16 ^G (3.62)	1.84 ^D (0.07)	47.69 ^C (0.28)	0.31 ^{AB} (0.05)	154.86 ^B (20.56)	40.07 ^E (1.45)	38.31 ^{BC} (2.18)
<i>Vochysia guatemalensis</i>	0.75 ^F (0.08)	0.26 ^I (0.03)	65.32 ^A (2.29)	3.47 ^B (0.46)	46.38 ^D (0.06)	0.34 ^A (0.04)	138.49 ^B (15.08)	43.83 ^D (2.09)	48.39 ^A (6.54)

Nota: letras diferentes para cada una de las características significan diferencias estadísticas a un 95%.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El rango de variación (16500 a 20594 kJ/kg) encontrado en PC máximo de las 10 especies plantación de rápido crecimiento de Costa Rica (Figura 1a) concuerda con los valores encontrados para otras especies tropicales, pero creciendo en la India (Kumar et al. 2011, Kataki and Konwer, 2002). Así mismo en las especies que se presentan albura y duramen, la falta de consistencia de cuál de estos dos tipos de madera presenta mayor CV, también ha sido señalado por otros autores (Shanavas and Kumar, 2003, White 1987, Kataki and Konwer, 2001). Dichos autores encontraron que en algunas especies la albura presenta mayor PC que el duramen, pero para otras especies fue contrario, la madera de duramen presento un PC más alto. Resultados similares a los obtenidos en el presente estudio, donde en *A. mangium* y *T. grandis* la albura presenta mayor PC que la madera de duramen, pero en *C. lusitanica*, *G. arborea* y *S. macrophylla*, el duramen presenta mayor PC que la albura (Figura 1a).

Algunos estudios, como los llevados a cabo por Singh and Khanduja (1984) y Goel and Belh (1996) señalan que las especies de alto PE y alta DV poseen los valores PC más altos, y además presentan un lento quemado, haciéndolas más deseables como combustibles. Pero la capacidad de combustión que posee una especie también depende de su CHg (Senelwa and Sims 1999, Jain 1993, Jain and Singh 1999), sobre todo porque un alto valor de CHg hace menos eficiente a la madera como combustible, debido a que el valor del poder calórico neto es reducido. Sin embargo, en el presente estudio se encontró que tanto el PE como la DV no fueron correlacionados con ninguno de los parámetros energéticos evaluados. Este resultado sugiere que los parámetros energéticos de las especies de reforestación estudiadas están influenciados por otras características de la madera.

El contenido de cenizas en la madera es una característica importante que afecta de igual forma la capacidad de combustión. Una alta cantidad de cenizas en madera la hace menos deseable como combustible (Kumar et al 2010, Kumar et al 2009, Kataki and Konwer 2002, Jain and Singh 1999). El porcentaje de cenizas fue negativamente significativo el PC máximo como en el PC verde, cuando el duramente está presente en los árboles. Pero en el caso de que los árboles produzcan solo albura el efecto del contenido de cenizas desaparece en el PC máximo, probablemente por la carencia de extractivos en este tipo de madera.

En relación al índice de combustibilidad (IC), que es uno de los mejores parámetros para comparar un combustible de entre especies (Purohit and Nautiyal, 1987), la variación encontrada de 348 a 6390 (Figura 1b) nuevamente coincide con valores reportados por otros autores (Kumar et al 2011, Kataki and Konwer 2002, Jain and Singh 1999). Así mismo, un aspecto importante de destacar es que *C. lusitanica*, una especie suave, presenta el valor estadísticamente más alto. Al respecto White (1987), menciona que las especies coníferas presentan un mayor potencial calórico debido a la alta presencia de resinas y extractivos.

La figura 2 muestra claramente el efecto lineal ($PC = \beta_0 + \beta_1 \cdot CHg$) del CHg en el PC, donde se observan claramente los beneficios que posee el secado de la biomasa antes de su combustión. Así mismo esto coincide con otros estudios llevados a cabo en *Pinus radiata* and *Eucaliptus nites* (Senelwa and Sims, 1999). La humedad no contribuye al PC, pero reduce el calor disponible para combustión, al respecto Senelwa and Sims (1999) señalan 3 aspectos importantes: (i) reduce el PC inicial de la madera, (ii) reduce la eficiencia de la combustión ya que el calor se absorbe en la evaporación de agua en las

etapas iniciales de combustión, lo que reduce tanto la temperatura de la llama como la transferencia de calor y (iii) por el efecto de hidrólisis en el agua caliente.

Los diferentes gradientes (β_0) en los modelos de variación del poder calórico con la disminución del CH encontrados entre la albura y el duramen en las especies con estos dos tipos de madera (*C. lusitanica* and *S. macrophylla* el gradiente de la pendientes es mayor en el duramen, pero en *A. mangium* and *T. grandis* la pérdida de calor es mayor en la albura, en tanto que *G. arborea* no hay diferencia en los dos tipos de tejidos), indican que la influencia del CH en el PC es diferente en cada tipo de madera, por lo que probablemente diferentes mecanismos durante la combustión están ocurriendo o bien los extractivos de la madera están influyendo en esta variación.

Las diferentes especies, como sucedió en la albura y duramen, también presentaron diferentes gradientes (β_0) en los modelos de variación del PC con la disminución del CH en la parte de la albura. Confirmando nuevamente que la influencia del CH en el PC es diferente para cada especie, por lo que diferentes mecanismos durante la combustión están ocurriendo producto de los constituyentes químicos o extractivos en la madera.

5. CONCLUSIONES

Los parámetros energéticos presentaron variaciones entre las especies de rápido crecimiento en plantaciones. La única conífera (*C. lusitanica*), presente de las 10 especies estudiadas, fue la especie con mayor potencial energético debido a sus altos valores de IC, PC y sus bajos contenidos de cenizas. Sin embargo, es necesario determinar los rangos de crecimiento y productividad de esta especie, así como establecer su óptimo desempeño en plantaciones orientadas a la producción de energía. No obstante, las otras especies de plantación a pesar de que no presentan los valores energéticos de *C. lusitanica*, poseen un potencial energético importante debido a los altos volúmenes de desechos o residuos que se obtienen en las distintas industrias.

Como era de esperar el CH presentó un efecto lineal sobre el PC de la madera, sin embargo, la influencia del CH en el PC es diferente para cada especie o tipo de madera (duramen o albura). Esto sugiere que diferentes mecanismos durante la combustión están ocurriendo, como la influencia de los extractivos de la madera.

6. BILIOGRAFIA

Alice, F; Montagnini, F; Montero, M. 2004. Productividad en plantaciones puras y mixtas de especies forestales nativas en la Estación Biológica La Selva, Sarapiquí, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 28(2): 61-71.

Andersen, R; Towers, W; Smith, P. 2005. Assessing the potential for biomass energy to contribute to Scotland's renewable energy needs. *Biomass Bioenergy* 29(2): 73-82.

ASTM (American Society for Testing and Materials). 2003a. D 5865-04 Standard test method for gross calorific value of coal and coke. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 04.10.

ASTM. American Society for Testing and Materials. 2003b. D 4442-92 Standard test methods for direct moisture content measurements of wood and wood-based materials. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 04.10.

ASTM (American Society for Testing and Materials). 2003c. D 143-94 Standard test methods for small clear specimens of timber. In Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 04.10.

ASTM (American Society for Testing and Materials). 2003d. D-1102-84 Standard test method for ash in wood. In Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06.

Goel, VL; Behl, HN. 1996. Fuelwood quality of promising tree species for alkaline soil sites in relation to tree age. *Biomass and Bioenergy* 10(1):57-61.

González, E; Fisher, R. 1998. Variation in selected wood properties of *Vochysia guatemalensis* from four sites in Costa Rica. *Forest Science* 44: 185-191.

Jain, RK; Singh, B. 1999. Fuelwood characteristics of selected indigenous tree species from central India. *Bioresource Technology* 68(3): 305-308.

Jain, RK. 1993. Fuelwood characteristics of some tropical trees of India. *Biomass and Bioenergy* 4(6):461-64.

Kataki, R; Konwer, D. 2001. Fuelwood characteristics of some indigenous woody species of north-east India. *Biomass and Bioenergy* 20(1): 17–23.

Kataki, R; Konwer, D. 2002. Fuelwood characteristics of indigenous tree species of north-east India. *Biomass and Bioenergy* 22: 433-437.

Kumar, R; Pandey, KK; Chandrashekar, N; Mohan, S. 2010. Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of Eucalyptus hybrid. *Journal of Forestry Research* 21: 514-516.

Kumar, JIN; Patel, K; Kumar, RN; Kumar, R. 2009. An assessment of Indian fuelwood with regards to properties and environmental impact. *Asian Journal on Energy and Environmental* 10: 99-107.

Kumar, JIN; Patel, K; Kumar, RN; Kumar, R. 2011. An evaluation of fuelwood properties of some aravally mountain tree and shrub species of Western India. *Biomass and Bioenergy* 35: 411-414.

Moya, R. 2004. Wood of *Gmelina arborea* in Costa Rica. *New Forests*. 28: 299-317

Murillo, O; Obando, G; Badilla, J; Sánchez, S. 2001. Perspectivas en las zonas altas de Costa Rica. *Biocenosis* 15(1-2): 66-71.

Offerman, R; Seidenberger, T; Thrän, D; Kaltschmitt, M; Zinoviev, S; Miertus, S. 2011. Assessment of global bioenergy potentials. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 16: 103-115.

Pang, S; Li, J. 2006. BIGCC (biomass integrated gasification combined cycle) system for New Zealand: An overview and perspective. *New Zealand Journal of Forestry* 51(2): 7-12.

Pérez, D; Kanninen, M. 2001. Stand growth scenarios for *Bombacopsis quinata* plantations in Costa Rica. *Forests Ecology and Management* 177: 427-439.

Petit, B; Montagnini, F. 2004. Growth equations and rotation ages of ten native tree species in mixed and pure plantations in the humid neotropics. *Forests Ecology and Management* 199: 243-257.

Piotto, D; Montagnini, F; Ugalde, L; Kanninen, M. 2003. Performance of forest plantations in small and medium sized farms in the Atlantic lowlands of Costa Rica. *Forest Ecology and Management*. 175: 195–204.

Purohit, AN; Nautiyal, AR. 1987. Fuelwood value index of Indian mountain tree species. *The International Tree Crops Journal* 4: 177-182.

Reuter, MA. 2011. Limits of Design for Recycling and “Sustainability”: A Review. *Waste Biomass Valor* 2: 183-208.

Seifert, K. 1960. Zur frage der Cellulose-Schnellbestimmung nach der Acetylaceton-Methode. *Papier* 14: 104-106.

Senelwa, K; Sims, REH. 1999. Fuel characteristics of short rotation forest biomass. *Biomass and Bioenergy* 17:127-40.

Shanavas, A; Kumar, M. 2003. Fuelwood characteristics of tree species in homegardens of Kerala, India. *Agroforestry Systems* 58: 11-24.

Singh, B; Khanduja, SD. 1984. Wood properties of some firewood shrubs of northern India. *Biomass* 4:235-8.

Sjöström, E. 1993. *Wood Chemistry, Fundamentals and Applications*, Second Edition. Academic Press, New York, 293 p.

TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, US). 2002. Tappi T 222 om-02 revised 2002. Standart test for acid-insoluble lignin in wood and pulp. Parkway South Norcross, US, TAPPI. 4p.

Ulloa, JB; Weerd, JH; Huisman, EA; Verreth, JAJ. 2004. Tropical agricultural residues and their potential uses in fish feeds: The Costa Rica situation. *Waste Management* 24, 87-97.

Velázquez, B. 2006. Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. *Ecosistemas* 15: 77-86.

White, RH. 1987. Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. *Wood Fiber Science* 19(4): 446-452.

ANEXO 3: Tenorio, C; Moya, R. 2012. Estudio termogravimétrico y de combustión de 10 especies forestales de rápido crecimiento en Costa Rica.

Estudio termogravimétrico y de combustión de 10 especies forestales de rápido crecimiento en Costa Rica

Resumen

Aunque, los residuos de plantaciones forestales de rápido crecimiento en los trópicos recientemente han tomado importancia para su aprovechamiento en energía, aún no se cuenta con la información suficiente sobre sus características de combustión y degradación térmica. De forma tal, que el presente estudio tuvo como objetivo determinar el comportamiento de los diferentes parámetros del análisis termogravimétrico (TGA) e identificar las diferentes partes del proceso de combustión, en diferentes contenidos de humedad, para 10 especies de reforestación en los trópicos. Así mismo fue establecida la relación de los parámetros del TGA con las propiedades químicas, energéticas y extractivos. Los resultados indican que especies como *B. quinata*, *V. guatemalensis* y *G. arborea* son especies de mayor estabilidad térmica y con etapas de combustión poco definidas, lo que las hace menos aptas para un proceso de combustión. Por el contrario, las especies *T. grandis*, *S. macrophylla* y *C. lusitanica* poseen una estabilidad térmica menor, pero un proceso de combustión con etapas bastante definidas, lo cual hace que estas especies sean más aptas en procesos de combustión donde se necesite generar calor. En tanto que el resto de las especies *A. mangium*, *T. amazonia*, *A. acuminata* y *T. oblonga* son especies con propiedades de combustión aceptables que ofrecen los diferentes parámetros de combustión fácilmente identificables y estabilidad térmica moderada.

Palabras clave: *degradación térmica, quemado, contenido de humedad, propiedades químicas, extractivos.*

Introducción

En los últimos años, con los problemas asociados al medio ambiente y al calentamiento global del planeta, amplias investigaciones se han llevado a cabo para encontrar fuentes de energía fiable y renovable (Berndes et al 2003). La biomasa se ha convertido en uno de los principales recursos de la bioenergía para hacer frente al agotamiento de los recursos de los combustibles fósiles y a la crisis del calentamiento global (Abdullah et al 2010, Offerman et al., 2011). Entre las biomásas utilizadas con fines de combustión se encuentra la biomasa leñosa proveniente de cultivos leñosos de corta rotación, residuos agrícolas, maderables e industriales, papel, plantas herbáceas, pastos, plantas acuáticas y otros materiales (Demirbas 2004). Así mismo en el proceso de transformación y aserrío de trozas se genera una enorme cantidad de residuos que pueden ser usados como fuentes de energía renovables (Offerman et al. 2011). No obstante, a pesar de la importancia que representa la madera como fuente de biomasa, aún existen limitantes en el conocimiento del comportamiento de este tipo de material durante los procesos de combustión y degradación térmica, especialmente para las especies de países tropicales (Castro et al 2007).

Generalmente, la degradación térmica y la combustión de la madera envuelven un número complejo de reacciones y de fases, entre las que se incluyen: pre-calentamiento, secado, pirolisis, ignición e incandescencia (Poletto et al 2010, Castro et al 2007). Browne

(1958) divide el proceso de pirolisis y combustión en 4 zonas: (a) debajo de 200 °C, se producen gases no combustibles, como vapor de agua, ácidos fórmicos y acéticos. Se presentan procesos de oxidación exotérmicos. (b) de 200 °C a 280 °C, en donde se producen los mismos gases que en la primera zona denominada como “a”, pero con una gran reducción del vapor de agua. En esta zona las reacciones son en su mayoría endotérmicas, y los productos son no combustibles. Se desarrollan las primeras reacciones exotérmicas pero sin ignición. (c) de 280 °C a 500 °C, toma lugar la pirolisis bajo condiciones exotérmicas. Los productos son en su mayoría combustibles (monóxido de carbono, metano, etc.), se puede presentar la combustión con llama si los gases son encendidos. (d) arriba de los 500 °C, en la cual los residuos consisten principalmente de carbón, y donde se pueden producir reacciones secundarias.

Muchos estudios se han realizado en especies maderables para investigar las características de combustión y descomposición térmica para diferentes objetivos. Por ejemplo, Demibras (2004) al estudiar las características de combustión de la madera encontró que los problemas en las etapas de ignición y combustión son atribuidos a un alto contenido de humedad, oxígeno y cenizas. Por otra parte, los procesos de combustión y pirolisis han sido ampliamente estudiados mediante la técnica de termogravimetría (TGA) desde el año 1970 (Ramiah 1970). Para los últimos años esta técnica ha sido ampliamente estudiada con el fin de conocer el comportamiento termogravimétrico de distintos materiales como chips de madera, cascara de distintas semillas, salvados de trigo, residuos del cultivo de palma africana y del arroz y diversos aceites, entre otros materiales (Gasparovic et al 2010, Ozgur et al 2012, Abdullah et al 2010). La técnica TGA aunque es muy utilizada, presenta la limitante de que en muchos casos las pruebas son realizadas en una atmosfera neutra o con nitrógeno, dejando de lado la presencia de oxígeno, que es uno de los elementos más importantes en los procesos de combustión (Nimmo et al., 2010).

Para la madera como material energético, aparte de su comportamiento termogravimétrico, sus características de combustión también juegan un papel importante, ya que dichas características son determinadas mediante pruebas realizadas en condiciones reales de combustión, en presencia de oxígeno (Castro et al 2007). Un estudio importante realizado en especies tropicales es el llevado a cabo por Castro et al (2007), donde se investigaron las características de quemado de cilindros de madera de *Tabebuia rosco-alba* y se encontró que el contenido de humedad afecta en forma significativa las fases de secado y pirolisis, pero no la fase de incandescencia, señalando que para altos contenidos de humedad no se produce ignición debido a liberación relativamente lenta de volátiles o a la liberación simultánea de volátiles y agua.

Los residuos de plantaciones forestales de rápido crecimiento o plantaciones energéticas en algunas regiones tropicales recientemente han tomado importancia por la cantidad de energía que se puede obtener de ellos (Kumar, 1992). Sin embargo, aún no se cuenta con la información de las características de combustión y degradación térmica de las especies de mayor uso comercial, por lo que se requiere de investigaciones que hagan un adecuado estudio de estos procesos. De forma tal, que el presente estudio tiene como objetivo determinar el comportamiento térmico por análisis termogravimétrico (TGA) y las etapas que intervienen en los procesos de quemado, bajo distintos contenidos de humedad para las 10 especies más utilizadas en plantaciones forestales en Costa Rica. Esta información ayudará a las industrias, reforestadoras y a otros entes a dar uso integral de la materia prima generada en las plantaciones.

Metodología

Material utilizado y muestreo

Diez especies de plantaciones forestales de rápido crecimiento de Costa Rica fueron utilizadas. El rango de edades de las plantaciones fue de 6 a 21 años. La Tabla 1, presenta la densidad y las condiciones dasométricas de las plantaciones. Tres árboles fueron seleccionados con un diámetro cercano al promedio de cada plantación. Los árboles muestreados presentaban buena forma y estaban libres de daños de ataques de insectos u hongos. De cada árbol fue cortada una troza de 1 metro en la base del árbol y pintada en sus extremos con el fin de disminuir la pérdida de humedad.

Tabla 1. Características dasométricas de las plantaciones utilizadas.

Especies	Edad (años)	Densidad (árboles/ha)	Altura total (m)	Diámetro (cm)	Peso específico	Contenido de humedad (%)
<i>Acacia mangium</i>	6	800	11.89	17.87	0.37	192.62
<i>Alnus acuminata</i>	11	338	20.99	27.90	0.36	87.21
<i>Bombacopsis quinata</i>	14	265	22.58	36.99	0.32	173.33
<i>Cupressus lusitanica</i>	18	400	17.60	33.65	0.42	83.49
<i>Gmelina arborea</i>	6	1000	15.90	20.60	0.39	137.52
<i>Swietenia macrophylla</i>	21	21	9.49	18.15	0.54	72.50
<i>Tectona grandis</i>	9	509	14.99	20.50	0.49	131.40
<i>Terminalia amazonia</i>	12	378	18.54	21.48	0.51	71.12
<i>Terminalia oblonga</i>	20	221	14.35	23.48	0.60	59.52
<i>Vochysia guatemalensis</i>	10	641	21.83	23.07	0.26	188.66

Obtención de muestras

El análisis termo-gravimétrico se realizó en material granulado y para ello fue extraído aserrín de cada troza y en aquellas especies que presentaban albura y duramen se trató de hacer una combinación de 50 y 50% de cada tipo de madera. El aserrín fue tamizado en mallas de 0.25 mm y 0.42 mm (40 to 60 meshes respectively) y el material entre estos dos tipos de mallas (aproximadamente 4 gramos) fue utilizado para el análisis termo-gravimétrico. En este análisis fueron probadas 4 muestras diferentes por especie. Por otro lado, en el análisis de las características de combustión de cada troza fueron cortadas piezas de 3 cm x 3 cm x 30 cm. Luego estas fueron torneadas para obtener cilindros de 2 cm x 30 cm, siguiendo la dirección de la fibra de la madera. De cada especie fueron extraídas 65 muestras de 2 cm de diámetro y 10 cm de largo. Así mismo del material sobrante de las trozas fueron extraídas muestras de 6 cm de ancho, 5 cm de largo y de 1 cm de espesor para la determinación del peso específico básico.

Determinación del peso específico y contenido de humedad

En las muestras de 6 cm de ancho, 5 cm de largo y de 1 cm de espesor fue medido su volumen por desplazamiento de volumen de agua sobre una balanza y luego se colocaron en un horno por 24 horas a 103 °C, acorde con la norma ASTM-143 (ASTM 2003a). El volumen y el peso seco al horno fue determinado para calcular el peso específico básico (peso seco/volumen verde).

En cada una de las especies, 5 cilindros (5.0 cm de diámetro y 10 cm de largo) fueron seleccionados para determinar el contenido de humedad en condición verde. Estos

fueron pesados y posteriormente fueron colocados por 24 horas en un horno de circulación de aire forzado a una temperatura de 103 °C, acorde con la norma ASTM D-4442 (ASTM 2003b). Luego de ese período se volvió a pesar, para obtener el peso seco. Finalmente se aplicó la ecuación 1.

$$MC = \frac{(\text{Peso verde} - \text{Peso seco})}{\text{Peso seco}} \times 100 \quad (1)$$

Determinación del poder calórico

El poder calórico (CV) fue determinado desde condición verde hasta la condición sin presencia de agua, obteniendo muestras en diferentes MC. Se utilizó aserrín tamizado de entre 0.25 mm y 0.42 mm y fue seleccionado el tamaño de partículas colectadas entre la malla de 40 y 60 mesh. Se obtuvo aproximadamente 100 gramos de material tamizado. El CV obtenido cuando la muestra fue recién cortada se llama CV verde, y el CV cuando el MC fue de 0% se llama CV máximo. El CV se basa en la determinación de la cantidad de energía total que un material orgánico emite, en este caso se determinó usando la prueba calorimétrica de Parr's mediante la norma ASTM D-5865 (ASTM 2003c).

Determinación de las propiedades químicas

Fueron determinadas la cantidad de lignina y celulosa, así como el porcentaje de Carbono (C), Nitrógeno (N) y la relación C/N. En la cuantificación de lignina se utilizó el método TAPPI T222 om-02 (TAPPI 2002) y en la determinación de celulosa se siguió el procedimiento seguido por Seifert (1960). En cada tipo de determinación se utilizaron 3 muestras diferentes. En la determinación del porcentaje de Carbono (C), Nitrógeno (N) y la relación C/N se utilizó el Elemental Analysensysteme, modelo Vario Macro Cube.

Extraíbles en diferentes solventes

Los extraíbles fueron determinados en agua (caliente y temperatura ambiente), acorde con la norma ASTM D-1110-84 (ASTM 2003d), en hidróxido de sodio (NaOH) utilizando el estándar ASTM D-1109-84 (ASTM 2003e), en una solución de etanol-tolueno con el estándar ASTM D-1107-96 (ASTM 2003f), y en diclorometano (CH₂-Cl₂) usando la norma ASTM D-1108-96 (ASTM 2003g). De cada tipo de extraíbles se realizaron 3 muestras.

Análisis termogravimétrico (TGA)

Las mediciones del análisis termogravimétrico (TGA) se llevaron a cabo utilizando 1 mg del aserrín de cada una de las especies tamizado entre 40 y 60 mesh, a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min en una atmósfera de nitrógeno y llegando a una temperatura de 950°C en 17 minutos. Fue utilizado un Analizador Termogravimétrico modelo TGA 5000, marca Instrument NBr. En dicho análisis se proporciona la temperatura y la pérdida de masa en las diferentes temperaturas (curvas TGA), además del análisis de la relación de la masa con la temperatura, mediante las curvas DTG (Figura 1a). De dichas curvas se deriva: (i) la temperatura de inicio de la descomposición (Ti) y al porcentaje de masa remanente al punto de inicio de la descomposición (Wti), estos valores corresponden a la primera gradiente en la curva del análisis TGA. (ii) la temperatura de deflexión antes del punto de máxima descomposición (Tsh) y a la masa remanente a este punto (Wtsh), en este caso, este punto solo fue visible para *A. mangium*, *A. acuminata*, *C. lusitanica*, *S. macrophylla*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga*. (iii) la temperatura correspondiente al punto de máxima descomposición (Tm), y masa remanente a este punto (Wtm) y (iv) el punto de temperatura y masa a consumir al final de la descomposición (Tf y Wtf),

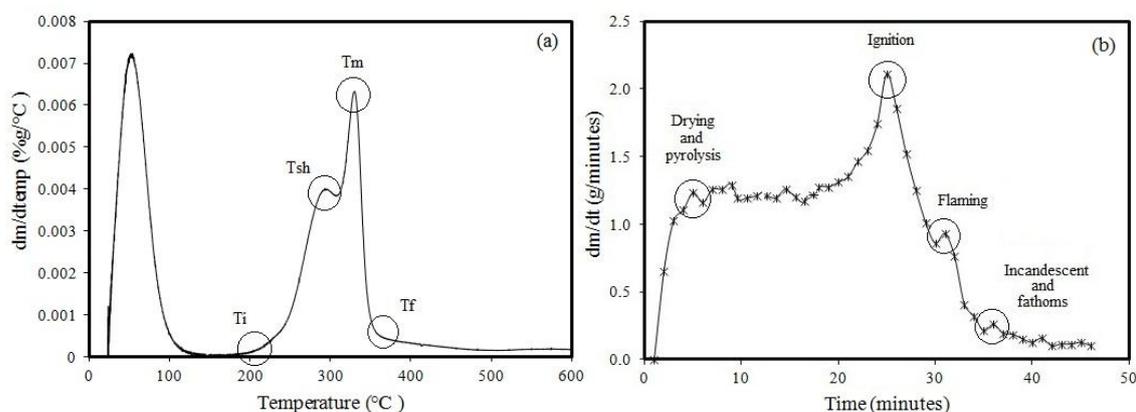
corresponden al punto en que la pérdida de masa comienza a estabilizarse al aumentar la temperatura.

Análisis de quemado

La primera parte de esta prueba, consistió en acondicionar las 60 muestras cilíndricas a MC de 100%, 80%, 60%, 40%, 20% y 0%, 10 muestras por cada MC. En el caso de las especies *G. arborea* (en albura), *S. macrophylla*, *T. amazonia* y *T. oblonga* no fue posible tener las muestras en los MC de 80% y 100%, ya que para estas especies el contenido de humedad máximo fue de 68%, 72%, 71% y 59% respectivamente. Para lograr el acondicionamiento, con la determinación del contenido de humedad verde, fue calculado el peso al MC deseado y de forma tal que la muestra se secará hasta obtener el peso deseado.

La segunda parte consistió en hacer el análisis de quemado. Para ello se construyó un sistema cilíndrico de calentamiento, de 10 cm de diámetro, con resistencias de 1000 watts, basado en el diseño presentado por Castro y Costa (2007). Este sistema de calentamiento fue rodeado por un cilindro de hierro de 25 cm de diámetro, para evitar pérdidas de calor. Durante la prueba de quemado la muestra cilíndrica es colocada en un soporte debajo del sistema de calentamiento sobre una balanza debidamente protegida del calor con una precisión de 0.01 g. El detalle y funcionamiento de este sistema de quemado puede ser consultado en Castro et al. (2007). La prueba de quemado consistía en que cuando la parte interna del cilindro presentaba una temperatura de 450 °C, se colocaba la muestra cilíndrica y se cubría para que iniciara el proceso de combustión. Al colocar la muestra se cronometra el tiempo y se tomaba el peso en intervalos de 1 minuto hasta que el peso de la muestra alcanzara un peso más o menos constante.

Con los datos de peso y tiempo fue calculada la pérdida de masa (porcentaje) con el tiempo para cada contenido de humedad, para cada especie, así mismo fue graficado este comportamiento. En el caso de *T. grandis* se hizo el análisis para los dos tipos de madera que presentaban (albura y duramen). Posteriormente fue calculada la pérdida de masa en cada intervalo de tiempo (dm/dt) y graficado este valor en relación al tiempo. En este último gráfico se observan visualmente las diferentes etapas de quemado (Figura 1b): inicio de pirolisis, ignición, fin de llama e inicio de incandescencia (Castro et al. 2007). Al identificar estas etapas se establece el consumo de masa por cada etapa. En *G. arborea* y *V. guatemalensis* no fue posible establecer las diferentes etapas de la combustión para contenidos de humedad mayores a 20%, ya no se establecía un comportamiento definido en cada etapa. Por otro lado, aunque *T. grandis*, presentaba albura y duramen, para comparar con las otras especies se utilizaron los valores del duramen.



INFORME FINAL DE PROYECTO

“Parámetros energéticos de residuos de 10 especies forestales de rápido crecimiento”

Figura 1. Puntos donde ocurren las etapas del proceso de degradación de la madera por TGA para *A. acuminata* (a) y del proceso de quemado para un cilindro de *T. oblonga* a 60% de MC (b).

Análisis estadístico

Se desarrollo un análisis descriptivo (media, desviación estándar, valores máximos y mínimos) para las variables del TGA (temperatura y masa de inicio de descomposición, temperatura y masa correspondiente antes de la máxima descomposición, la temperatura y masa en la máxima pérdida de masa, y a la temperatura y masa del final de la descomposición). Además, se verificó si las variables cumplían con los supuestos de la distribución normal, homogeneidad de las varianzas, así como la presencia de datos extremos. El procedimiento GLM de SAS (SAS Institute 1997) fue aplicado para estimar la significancia de la especie como única fuente de variación del modelo. La existencia de diferencias significativas entre los promedios de las variables del TGA fue verificada mediante la prueba de Tukey ($P < 0.05$). Finalmente, se llevo a cabo un análisis de correlación entre los parámetros del TGA (T_i , T_{sh} , T_m , T_f , W_{ti} , W_{tsh} , W_{tm} , W_{tf}), como variables dependientes, y el poder calórico, contenido de cenizas, el porcentaje de carbono, nitrógeno, celulosa y lignina, y los extractivos, como variables independientes.

Resultados

Termogravimetric Analysis (TGA and DTG)

La figura 2 presenta las curvas de TGA y DTG para las 10 especies, estas fueron agrupadas en base a la similitud de su comportamiento en el DTG. Las especies con marcados puntos de T_{sh} se concentran en dos grupos. El primero conformado por *A. acuminata*, *S. macrophylla*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga*, en las cuales se presenta un comportamiento muy similar hasta el final de la descomposición, posterior a esto se comienzan a notar diferencias entre ellas, especialmente entre *A. acuminata*, *T. amazonia* y el resto de las especies (Figura 2a). El segundo grupo esta formado por *A. mangium*, *B. quinata*, *C. lusitanica*, *G. arborea*, *V. guatemalensis* las cuales presentan una mayor variación desde el punto de inicio de la descomposición (Figura 2b). *B. quinata* y *G. arborea* tienen un comportamiento similar en el TGA, pero diferente al de *A. mangium* y *V. guatemalensis*, que son similares entre sí.

Las figuras de DTG (Figura 2c y 2d) de todas las especies presentan 2 picos máximos, el primero que se ubica por debajo de los 100°C, y el segundo que corresponde a T_m . Para el grupo formado *A. acuminata*, *S. macrophylla*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga* (Figura 2c) antes de llegar al T_m , se presenta un punto de inflexión o “montura”, denominado como T_{sh} . Además se observan pocas diferencias entre las especies, a excepción de *A. acuminata* que posee un T_{sh} mucho más marcado que el resto. En el caso de las especies del segundo grupo, formado por *A. mangium*, *B. quinata*, *C. lusitanica*, *G. arborea*, *V. guatemalensis* (Figura 2d) no se evidencia en forma clara la inflexión o T_{sh} . Para *B. quinata*, *G. arborea* y *V. guatemalensis*, no se presenta punto de T_{sh} . Además *B. quinata* y *G. arborea* presentaron la T_m más baja de las 10 especies.

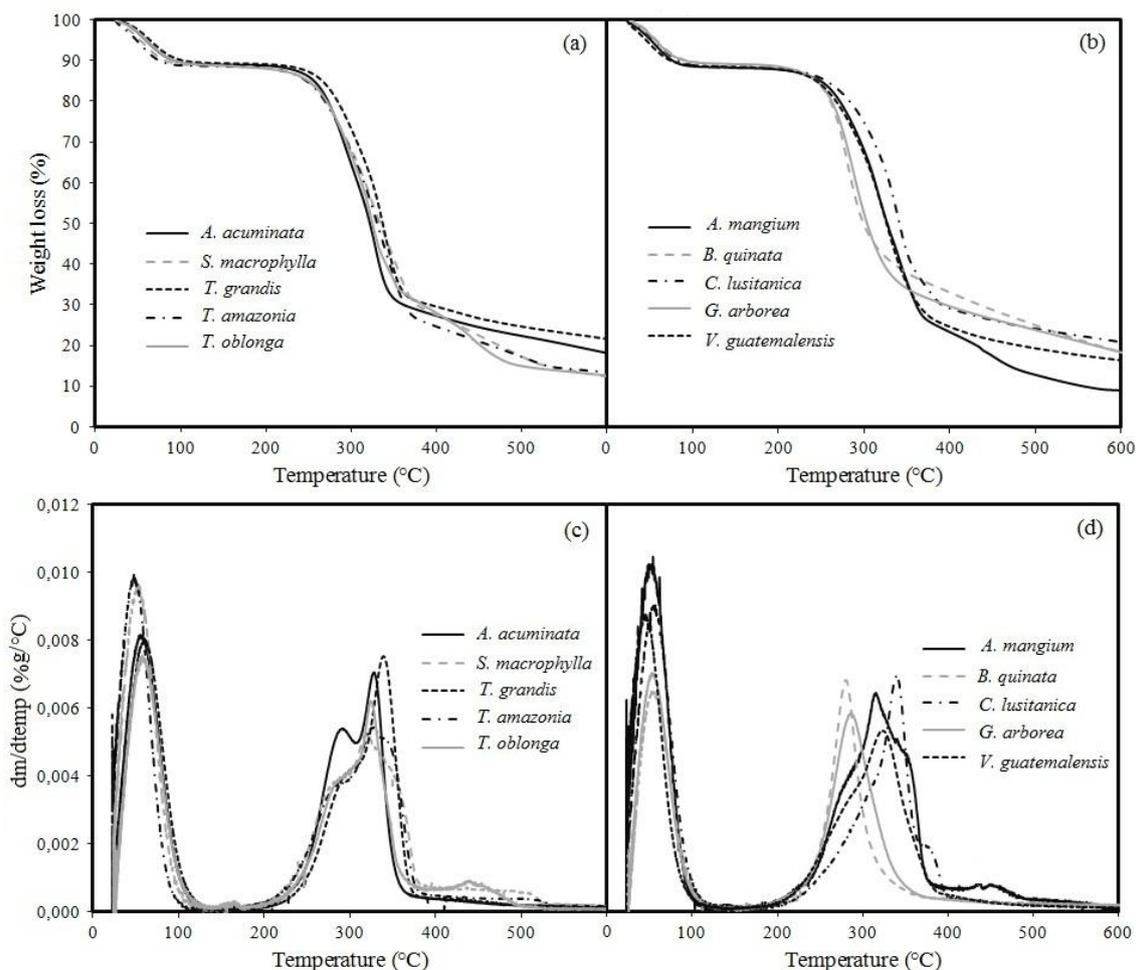


Figure 2. TGA (a, b) and DTG (c, d) curves of ten fast-growth species in Costa Rica.

En relación con los diferentes parámetros obtenidos de TGA se tiene que al inicio de la descomposición, la T_i varió de 192°C a 201°C con W_{Ti} de 87.7% y 89.2%. En esta etapa *A. acuminata* es la especie de mayor T_i , seguida de un grupo de especies formado por *T. oblonga*, *G. arborea*, *B. quinata*, *T. grandis*, *A. mangium* y *C. lusitanica*, con temperaturas que varían de 194°C a 199°C, y finalmente un grupo compuesto por *V. guatemalensis*, *T. amazonia* y *S. macrophylla* con los valores más bajos de T_i . A diferencia del parámetro T_i y el resto de parámetros evaluados, se encontró que W_{Ti} es el parámetro donde se presentaron la mayor cantidad de diferencias entre las especies (Tabla 2). Las especies se agruparon de la siguiente manera: un primer grupo compuesto por *A. acuminata*, *G. arborea* y *T. grandis*, con valores que varían de 88.7% a 89.2% respectivamente, seguidas por *T. amazonia*, *S. macrophylla* y *B. quinata* y finalmente un grupo formado por *A. mangium*, *V. guatemalensis*, *C. lusitanica* y *T. oblonga*, con los valores de W_{Ti} más bajos (de 87.8% a 88.2%).

La etapa intermedia (T_{sh}), entre el punto de inicio y de máxima descomposición, no fue visible en *B. quinata*, *G. arborea* y *V. guatemalensis*. Para el resto de las especies T_{sh} varió de 282°C a 316°C. La variación de W_{Tsh} fue de 67.7% a 75.5% (Tabla 2). Las especies que presentaron T_{sh} fueron agrupadas de la siguiente manera: *T. grandis* y *C. lusitanica* como las especies de mayor temperatura, seguidas por *A. acuminata*, *T. amazonia* y *T. oblonga* con T_{sh} de 291°C a 297°C, y finalmente *A. mangium* y *S. macrophylla* con las T_{sh} más bajas. De igual forma para W_{Tsh} , *S. macrophylla* y *A.*

mangium con los valores más altos, *C. lusitanica* con el valor más bajo y el resto de las especies entre 71.3% y 72.3%.

Con respecto a la mayor descomposición (máxima pérdida de masa), se observó que T_m varió de 282°C a 348°C y su W_{tm} varió de 28.6% a 40.0% (Tabla 2). Agrupando las especies de acuerdo a las diferencias estadísticas de las medias de T_m , 2 grupos pueden ser establecidos: uno compuesto por las especies *B. quinata* y *G. arborea* como las especies de menor T_m , y el resto de las especies con valores que varían entre 323°C (*V. guatemalensis*) y 348°C (*C. lusitanica*). En el parámetro W_{tm} , las especies se agruparon en 3 grupos: *B. quinata* y *G. arborea* con los valores más altos, seguido de *S. macrophylla* y *T. oblonga* con valores de 33.7% a 35.5%, luego se agrupa *A. mangium*, *V. guatemalensis*, *T. amazonia*, *A. acuminata*, *T. grandis* y *C. lusitanica* con valores entre 28.6% y 32.1% (Tabla 2).

En la última etapa del TGA, se encontró que para la T_f la variación fue entre 365°C (*B. quinata*) y 401°C (*V. guatemalensis*). Las especies se agruparon en 3 grupos: *V. guatemalensis* como la especie con mayor T_f , *B. quinata* y *A. acuminata* como las especies con menor T_f , y el resto de las especies con T_f de 372°C a 388°C (Tabla 2). Para las masas del punto final de descomposición (W_{ft}) aunque se presentaron mayores diferencias estadísticas entre especies, fue posible hacer 3 grupos (Tabla 2). *G. arborea*, *T. oblonga* y *B. quinata* como las especies de mayor porcentaje con W_{ft} , *V. guatemalensis* como la especie de menor W_{ft} y el resto de las especies agrupadas en el rango de 5.36% a 11.30%.

Tabla 2. Results of TGA analysis of ten fast-growth species in Costa Rica.

Especie	Ti (°C)	Tsh (°C)	Tm (°C)	Tf (°C)	Wti (%)	Wtsh (%)	Wtm (%)	Wtf (%)
<i>Acacia mangium</i>	198 ^{AB} (5.3)	282 ^E (3.1)	334 ^A (17.4)	375 ^{AB} (17.2)	87.8 ^E (0.1)	75.5 ^A (3.0)	28.6 ^C (5.0)	25.4 ^{BC} (3.3)
<i>Alnus acuminata</i>	201 ^A (2.4)	291 ^{CD} (2.5)	328 ^A (0.4)	368 ^B (6.3)	88.7 ^{ABC} (0.2)	71.3 ^{AB} (3.2)	31.6 ^{BC} (0.9)	28.9 ^{BC} (0.9)
<i>Bombacopsis quinata</i>	195 ^{AB} (4.1)	-	282 ^B (3.4)	365 ^B (12.8)	88.6 ^{BCD} (0.2)	-	40.0 ^A (0.1)	35.3 ^A (2.2)
<i>Cupressus lusitanica</i>	199 ^{AB} (1.6)	316 ^A (4.0)	348 ^A (17.5)	388 ^{AB} (9.8)	88.1 ^{CDE} (0.3)	67.7 ^B (0.2)	32.1 ^{BC} (4.9)	29.1 ^{BC} (4.3)
<i>Gmelina arborea</i>	194 ^{AB} (2.9)	-	285 ^B (1.9)	372 ^{AB} (9.0)	88.9 ^{AB} (0.2)	-	36.5 ^{AB} (1.3)	31.0 ^{AB} (0.9)
<i>Swietenia macrophylla</i>	192 ^B (3.0)	285 ^{DE} (3.8)	339 ^A (18.6)	387 ^{AB} (18.0)	88.4 ^{BCD} (0.2)	73.0 ^A (2.2)	33.7 ^{ABC} (5.7)	28.3 ^{BC} (3.2)
<i>Tectona grandis</i>	196 ^{AB} (1.9)	301 ^B (1.4)	338 ^A (0.6)	386 ^{AB} (4.8)	89.2 ^A (0.1)	72.3 ^{AB} (1.3)	32.1 ^{BC} (0.6)	29.9 ^{ABC} (0.5)
<i>Terminalia amazonia</i>	191 ^B (2.2)	292 ^{CD} (1.3)	338 ^A (10.2)	385 ^{AB} (14.2)	88.5 ^{BCDE} (0.4)	71.0 ^{AB} (2.5)	29.6 ^{BC} (1.9)	25.5 ^{BC} (1.5)
<i>Terminalia oblonga</i>	193 ^{AB} (3.2)	297 ^{BC} (2.2)	328 ^A (3.2)	376 ^{AB} (13.6)	88.2 ^{CDE} (0.1)	71.3 ^{AB} (0.8)	35.5 ^{ABC} (1.7)	31.3 ^{AB} (2.5)
<i>Vochysia guatemalensis</i>	191 ^B (4.1)	-	323 ^A (1.8)	400 ^A (10.6)	88.1 ^{DE} (0.4)	-	29.6 ^{BC} (3.6)	24.4 ^C (3.5)

Note: Ti = temperature corresponding to the beginning of the decomposition. Tsh = temperature corresponding to deflection point before maximum decomposition; Tm=temperature corresponding to the maximum rate of mass loss; Tf = temperature corresponding to the ending of the decomposition; Wti = remnant mass at Ti; Wtsh = remnant mass at deflection point before maximum decomposition; Wtm = remnant mass at the maximum rate of mass loss; Wtf = remnant mass at Tf. Letras diferentes para cada una de las características significan diferencias estadísticas a un 95%.

La relación entre los parámetros de TGA (Ti, Tsh, Tm, Tf, Wti, Wtsh, Wtm and Wtm) y el poder calórico, los parámetros químicos y los extractos en diferentes solventes, mostró que el porcentaje de carbono, nitrógeno y celulosa y los extractivos en agua caliente, afectaron algunos parámetros del TGA. La Ti fue afectada negativamente por el poder calórico verde. La Tf fue afectada negativamente por el poder calórico máximo y positivamente por los extractivos en agua caliente. El porcentaje de carbono afecto en forma positiva a la Tsh y el porcentaje de nitrógeno en forma negativa a la Wti. La Wtm se vio afectada en forma negativa por el porcentaje de celulosa y en forma positiva por los extractivos en agua caliente.

Tabla 3. Correlation coefficients between energy parameters, chemicals components, extractives and TGA parameters of ten fast-growth species in Costa Rica.

Characteristics	Ti (°C)	Tsh (°C)	Tm (°C)	Tf (°C)	Wti (%)	Wtsh (%)	Wtm (%)	Wtf (%)
PC verde albura	-	-	-	-	-	-	-	-
PC 0% albura	-	-	-	0.97*	-	-	-	-
Carbon (%)	-	0.98*	-	-	-	-	-	-
Nitrogen (%)	-	-	-	-	-0.98*	-	-	-
Ash (%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Celullose (%)	-	-	-	-	-	-	-0.97*	-
Lignin (%)	-	-	-	-	-	-	-	-
Extractives in:	NaOH	-	-	-	-	-	-	-
	Hot wáter	-	-	-	0.95*	-	-	0.99**
	Cold water	-	-	-	-	-	-	-
	Dicloromethane	-	-	-	-	-	-	-
	Ethanol-Toluene	-	-	-	-	-	-	-

Note: Ti = temperature corresponding to the beginning of the decomposition. Tsh = temperature corresponding to deflection point before maximum decomposition; Tm=temperature corresponding to the maximum rate of mass loss; Tf = temperature corresponding to the ending of the decomposition; Wti = remnant mass at Ti; Wtsh = remnant mass at deflection point before maximum decomposition; Wtm = remnant mass at the maximum rate of mass loss; Wtf = remnant mass at Tf. * parámetro estadísticamente significativa al 95% y ** parámetro estadísticamente significativa al 99%.

La primera etapa de la curva de TGA (eliminación de agua y rango de temperatura antes de llegar a Ti-Figura 1a) debe ser explicada con la ayuda de la eliminación y la presencia del agua en la madera. El agua se presenta de 3 formas: el agua libre, el agua unida o ligada y el agua de constitución. El agua libre para evaporarse necesita poca energía, mientras que el agua ligada y de constitución forma enlaces químicos con las paredes de la madera y necesita de la carbonización completa para ser eliminada (Skaar 1972). Durante el proceso de combustión el agua libre se elimina entre los 60°C y 100°C (Wielage et al 1999, Demirbas 2004, Shebani et al 2008, Poletto et al 2010). La eliminación de este tipo de agua se observa en la curva DTG como el punto máximo que se presenta antes de los 100°C (en este caso la humedad en las muestras fue aproximadamente de un 12%), correspondiente a una alta descomposición, sin embargo, este punto no se tomo en cuenta para el análisis de las especies (Figura 2c y b). Por otro lado, a diferencia de la eliminación del agua libre, el agua ligada asociada a los constituyentes de la madera (hemicelulosas y celulosas) ocurre sobre los 160°C, momento en que la estabilidad térmica comienza a decrecer gradualmente y las diferentes etapas de la descomposición inician (Wielage et al 1999, Islam et al 2011).

En la segunda parte de la curva de TGA, entre los 200°C y 400°C, y de acuerdo a Browne (1958), Demirbas (2004) y Poletto et al (2010) pueden ocurrir dos eventos distintos en el proceso de degradación: (i) por encima de los 250°C, inicia la descomposición de la hemicelulosa y la lenta degradación de la lignina, para este estudio este primer punto de descomposición se llamo Tsh y Wtsh, y ocurrió alrededor de los

282°C y los 316°C, pero solo fue posible identificar la descomposición de estos componentes de la madera en *A. mangium*, *S. macrophylla*, *A. acuminata*, *T. amazonia*, *T. oblonga*, *T. grandis* y *C. lusitanica*. (ii) alrededor de los 300°C se lleva a cabo la degradación de la celulosa y este punto es identificado como Tm y Wtm, y es donde se produce la máxima descomposición de la biomasa. En el caso de las especies estudiadas este punto si fue visible entre 282°C a 352°C (Tabla 2, Figura 2).

Finalmente la etapa final de la descomposición, donde todos los componentes de la madera se han degradado y quedan en su mayoría cenizas, corresponde al Tf, y en las especies analizadas esta variación se presento en temperaturas de 365°C a 400°C (Tabla 2).

En este caso para las 10 especies de rápido crecimiento en plantaciones de Costa Rica, la temperatura de inicio de la descomposición varió (de 191°C a 200°C) son temperaturas ligeramente más bajas que las reportadas en otras especies tropicales, como por ejemplo *Dyera costulata*, *Endospermum diadenum*, *Paraserianthes moluccana*, *Hevea brasiliensis*, *Alistonia pneumatophora* y *Eucalyptus grandis* (Poletto et al., 2010, Islam et al., 2011). Pero los rangos de Tm y Tf son similares a los reportados para esas especies. Las diferencias encontradas entre los parámetros de las especies estudiadas con anteriores estudios también puede radicar en las condiciones utilizadas en el TGA, Islam et al. (2011) utilizaron muestras de 5 a 10 mg de aserrín de cada una de las especies a una velocidad de calentamiento de 10°C/min y Poletto et al (2010) manejaron velocidades de 5 hasta 40°C/min para 10mg de aserrín, ambos estudios con condiciones diferentes a las utilizadas en el presente con muestras de 1mg y una velocidad de 20°C/min.

Las especies estudiadas presentaron diferencias estadísticas entre algunos de los parámetros del TGA (Tabla 2). Al respecto, Poletto et al (2010) señala que las diferencias de TGA en las diferentes especies son asociadas con la cantidad de extractivos presentes las muestras de madera. Shebani et al (2008) señalan que madera libre de extractivos mejora la estabilidad térmica en relación de aquella que presenta extractivos y que al incrementar la cantidad de celulosa y lignina tendrá mejor estabilidad térmica el material. Esto fue comprobado en el presente estudio con el análisis de correlación (Tabla 3) en la cual mostró que extractivos en agua caliente se encuentran relacionados positivamente con la Tf y la Wtm, de forma que a mayor cantidad de extractivos, mayor será la Tf y la Wtm (Tabla 3). Pero en el caso de la cantidad de celulosa mostro el efecto contrario del mencionado Shebani et al (2008). La Wtm fue negativamente correlacionada con el porcentaje de celulosa, es decir, que a mayor porcentaje de celulosa, menor será la masa remanente en la temperatura de máxima descomposición, por lo tanto será menos estable (Tabla 3).

El análisis de correlación mostro que Ti, Tm, Wtsh y WTf, no fueron afectados por lo constituyentes químicos de la madera, no obstante en estos parámetros si se presentaron diferencias entre las especies, por lo que probablemente otros mecanismos o factores no evaluados en el presente estudio estén influyendo en el comportamiento térmico de las especies.

Islam et al (2011) sugiere que aquellas especies con pérdidas de masa altas, presentan una menor estabilidad térmica. Basado en ello, en el punto de mayor descomposición (Tm) *B. quinata* y *G. arborea* presentan los valores más altos de masa remanente (Wtm) por tanto son especies de mayor estabilidad térmica y por tanto menos aptas para un proceso de combustión (Tabla 2). Por el contrario, las especies *A. mangium*, *V. guatemalensis*, *T. amazonia*, *A. acuminata*, *T. grandis* y *C. lusitánica*, son de menor Wtm y por lo tanto son menos estables térmicamente y aptas para un proceso de combustión. En la etapa final de la descomposición *B. quinata*, *T. oblonga* y *G. arborea* presentan valores de Wtf más altos y por tanto son nuevamente las especies más estables

térmicamente. *A. mangium* y *V. guatemalensis*, con valores de W_{tf} bajos, son menos estables y más aptas para la combustión (Tabla 2, Figura 2). Estos resultados sugieren que *G. arborea* y *B. quinata* son las especies que menos masa pierden durante el proceso de descomposición térmica, lo cual las hace menos aptas para ser utilizadas como combustibles, caso contrario al de *A. mangium* y *V. guatemalensis* especies más aptas debido a que pierden más masa. (Tabla 2).

Burning characteristics

Las curvas de evolución de la masa con respecto al tiempo para las 10 especies se muestran en la figura 3. Como era de esperar, la pérdida de la masa está relacionada con el MC. En todas las especies para bajos MC (0%, 20% y 40%) la masa se quema más rápidamente que cuando se presentan MC cercanos al 100%. También es posible observar que en *C. lusitanica*, *G. arborea*, *S. macrophylla* y *T. grandis* el tiempo de quemado es más prolongado, estas tardan entre 30 a 60 minutos dependiendo del MC (Figura 3d, 3e, 3f, 3g, 3h y 3i), para alcanzar pérdidas de masa sobre 90%. A diferencia de las otras especies cuyos tiempos de quemado varían de 20 a 40 minutos para obtener la misma pérdida de masa (Figura 3a, 3b, 3c, 3j, 3k y 3l).

La evaluación del consumo de la masa en relación al tiempo (dm/dt) mostró los siguientes aspectos a destacar de las 10 especies de madera:

(i) Para *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga* en los diferentes MC estudiados se identificaron claramente cada una de las etapas del quemado con el parámetro dm/dt (Figura 4h, 4i, 4j, 4k)

(ii) En las especies *A. acuminata* y *S. macrophylla* se identificaron las diferentes etapas de quemado (Figura 4b, 4g) pero no con la facilidad con que se distinguen en *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga*.

(iii) Para *A. mangium*, *B. quinata* y *C. lusitanica* en MC sobre 40% no fue posible distinguir en forma clara las etapas, principalmente las de ignición y fin de llama (Figuras 4a, 4c and 4d). Contrario a los MC de 0% y 20% donde si se pueden apreciar en forma clara las diferentes etapas del quemado.

(iv) *G. arborea* y *V. guatemalensis* en MC de 40, 60, 80 y 100% no fue posible identificar las diferentes etapas de quemado (inicio de pirólisis, ignición, fin de llama e inicio de incandescencia) (Figura 4e, 4f and 4l).

(v) Los valores de consumo de masa en tiempo (dm/dt) variaron con el MC. En maderas de bajos MC (0% a 40%) se presentan valores máximos de dm/dt , con una variación de 1.20 a 4.28 g/min. Mientras que en madera de altos MC (60% a 100%) se obtiene valores de 1.19 a 1.97 g/min.

(vi) *T. oblonga*, *A. mangium*, *A. acuminata*, *T. amazonia* y *B. quinata* son las especies que presentan los valores más altos de dm/dt . Mientras que *S. macrophylla*, *T. grandis* y *C. lusitanica* presentan los valores más bajos, para MC de 0% a 40%.

Como es de esperar, la mayor tasa de consumo (g/min) se presentó en bajos MC, es decir la madera se quema en forma más rápida, pero la tasa de quemado fue diferente en cada una de las especies. De forma que dependiendo del uso energético, las especies se pueden dividir en dos grupos: (i) especies de rápida combustión (*T. oblonga*, *A. mangium*, *A. acuminata*, *T. amazonia* y *B. quinata*) que en bajos MC entregan todo su calor en un período de tiempo corto (20 a 40 minutos) y a tasas de quemado más altas. (ii) especies

de combustión lenta (*C. lusitanica*, *G. arborea*, *S. macrophylla*, *T. grandis* y *V. guatemalensis*), como por ejemplo para calefacción, como cuyo tiempo de quemado es más prolongado (30 a 60 minutos), y además presentan tasas de consumo de masa bajas (Figuras 3 y 4).

En especies de baja densidad como *G. arborea* y *V. guatemalensis* en MC de 40, 60, 80 y 100% su uso para combustión es poco recomendable, esto por que no es posible identificar claramente las diferentes etapas del proceso de quemado. En el caso que se utilicen bajos MC (inferior a 20%) las tasas de quemado son bajas, de 1.20 a 2.39 g/min y 1.26 a 1.87 g/min respectivamente (Figuras 3 y 4). El comportamiento del quemado en estas dos especies, presenta poca claridad en las diferentes etapas como resultado de una baja liberación de volátiles o de una liberación simultanea de agua y volátiles es la fase de ignición, esto hace que el consumo de masa durante el proceso de quemado tienda a ser constante, y no se produzca la ignición (Castro et al., 2007).

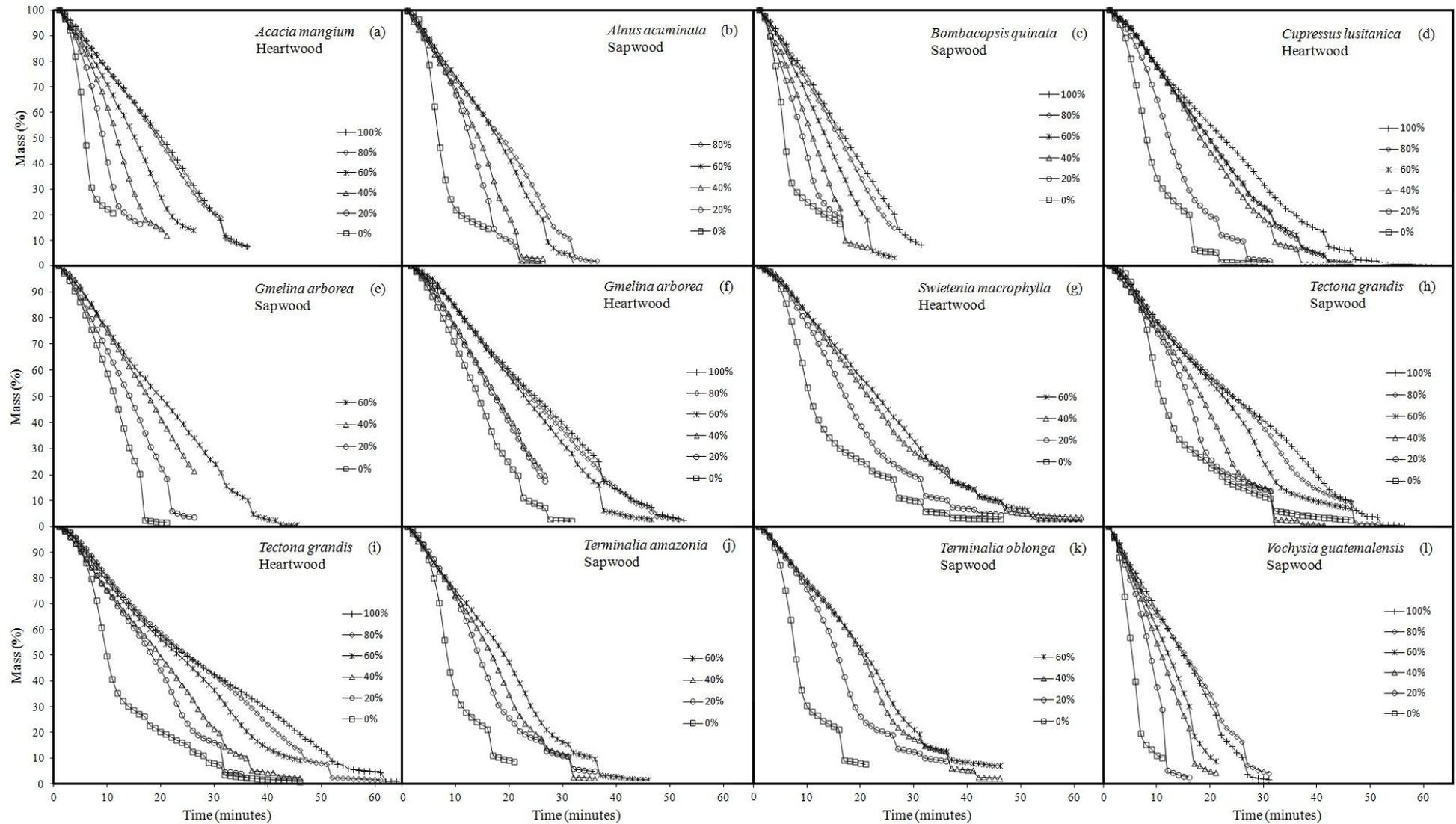


Figure 3. Mass evolution of eight fast-growth species in Costa Rica.

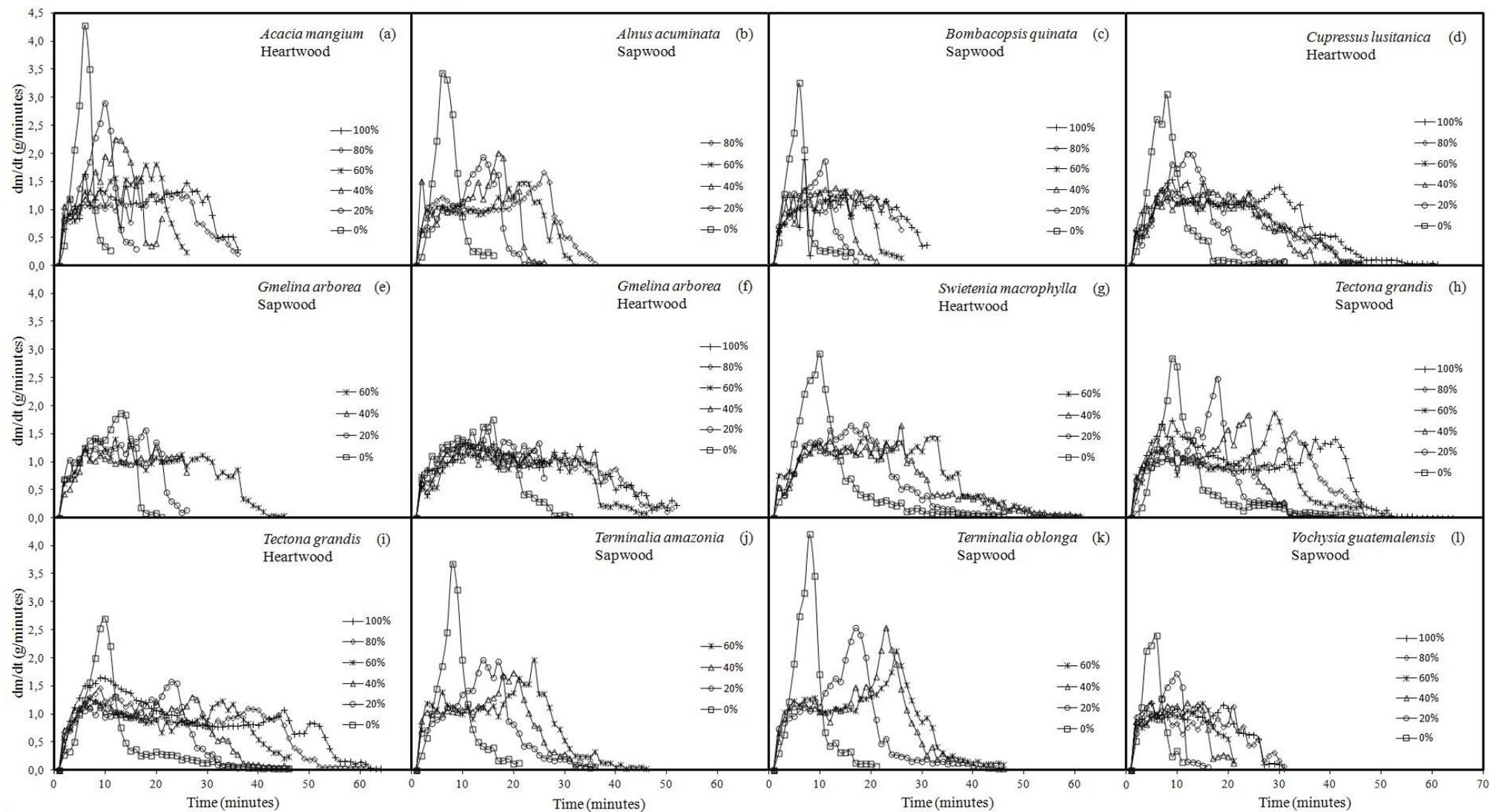


Figura 4. Mass consumption rates of ten fast-growth species in Costa Rica.

La figura 5 presenta la masa consumida por especie en los diferentes MC para las diferentes etapas de quemado. Se observa que en todas las especies y para los diferentes MC, la etapa de ignición es la que presenta el mayor consumo de masa, con valores que varían de 40% a 70% y además el consumo de masa tiende a aumentar conforme se incrementa el MC. En *B. quinata* (Figura 5c) y *G. arborea* (Figura 5e) el consumo de la masa en la etapa de ignición disminuye en los MC de 40% y 20% respectivamente. La etapa de secado y pirolisis, es por el contrario, la etapa donde se presenta el menor consumo de masa, con valores que varían de 2% a 7% en las diferentes especies. Es interesante hacer notar que en esta etapa el consumo de masa tiende a ser constante en los diferentes MC analizados.

En tanto que el consumo de la masa para las etapas de fin de llama e incandescencia, se mantienen con valores intermedios entre los valores de la etapa de ignición y secado y la etapa de pirolisis para la mayoría de las especies, con excepción de *T. grandis* (Figura 5g), donde esta última curva se mezcla con las curvas de fin de llama e incandescencia a partir del MC de 60%. En estas especies la tasa de consumo en fin de la llama e inicio de la incandescencia tiende a disminuir conforme aumenta el MC, con excepción de *B. quinata* y *G. arborea* donde la curva de fin de llama aumenta a partir del 40% de MC (Figura 5c) en *B. quinata* y en 20% para el fin de llama e incandescencia en *G. arborea* (Figura 5e). Como fue indicado para *G. arborea* y *V. guatemalensis* solo en los MC bajos fue posible identificar las diferentes etapas de quemado, de forma que solo se presentan las curvas para estos MC (Figure 5e y 5j).

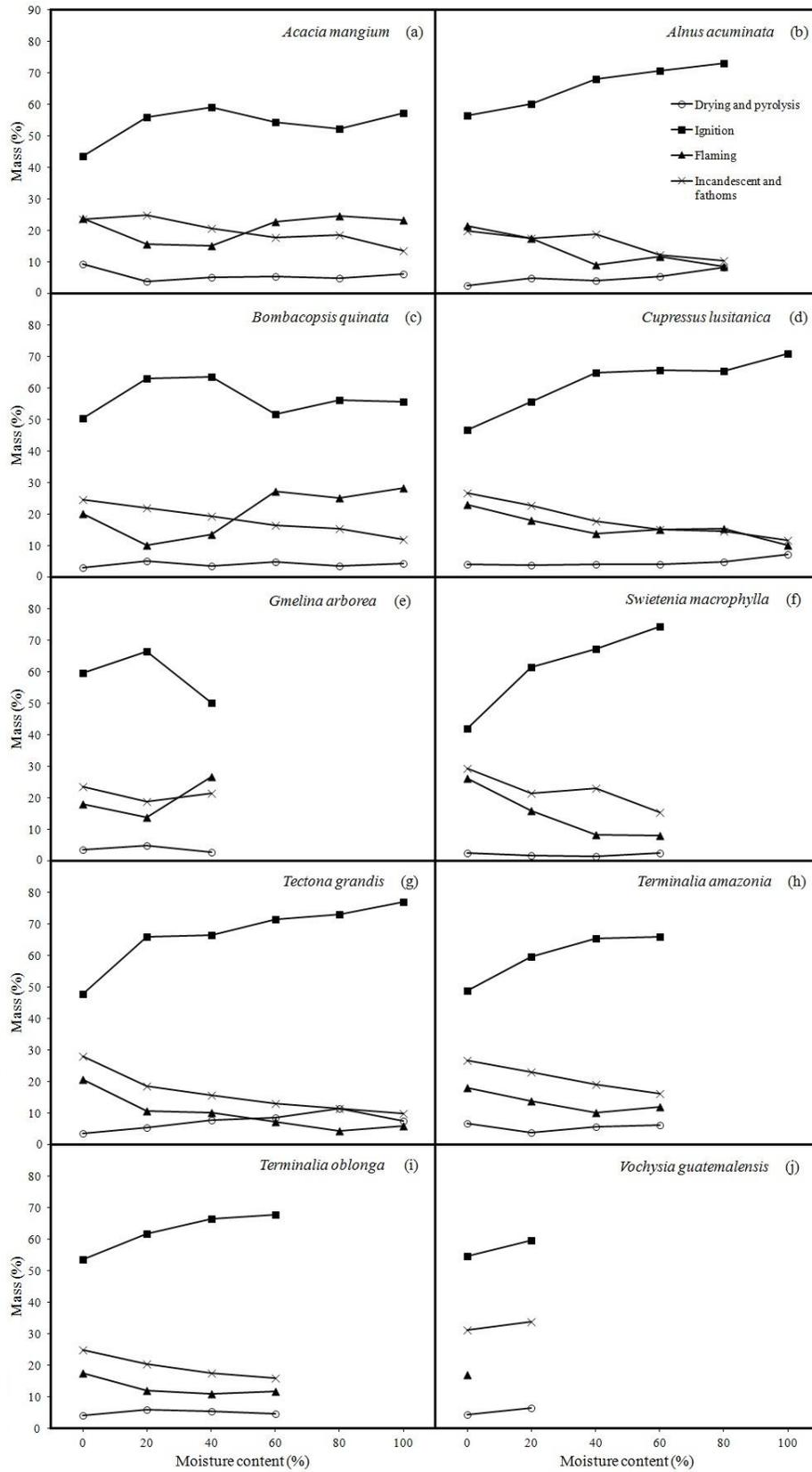


Figura 5. Masa consumida por especie y por etapa a diferentes contenidos de humedad of ten fast-growth species in Costa Rica.

La comparación de la masa consumida para las diferentes etapas de quemado de las 10 especies de reforestación es presentada en Figura 6. En la etapa de secado y pirolisis no se presentan grandes diferencias entre el consumo de masa en las diferentes especies y los diferentes MC, la única especie con valores ligeramente más altos es *T. grandis* (Figura 6a). En la etapa de ignición se presentan los consumos de masa más bajos para MC de 0%, sin embargo, el consumo de masa aumenta conforme aumenta el MC. *A. acuminata* es la especie que presenta los consumos de masa más altos y por el contrario *A. mangium* es la que presenta menor consumo de masa (Figura 6b). Las etapas de fin de llama e incandescencia presentan comportamientos similares entre las especies. En este caso los MC más bajos presentan los consumos de masas más altos (Figura 6c, 6d). En la etapa de fin de llama *T. grandis* y *S. macrophylla* son las especies que presentan mayores diferencias entre MC. En la etapa de incandescencia y brazas *T. grandis* es la especie que presenta una mayor diferencia entre el MC de 0% y el resto de MC.

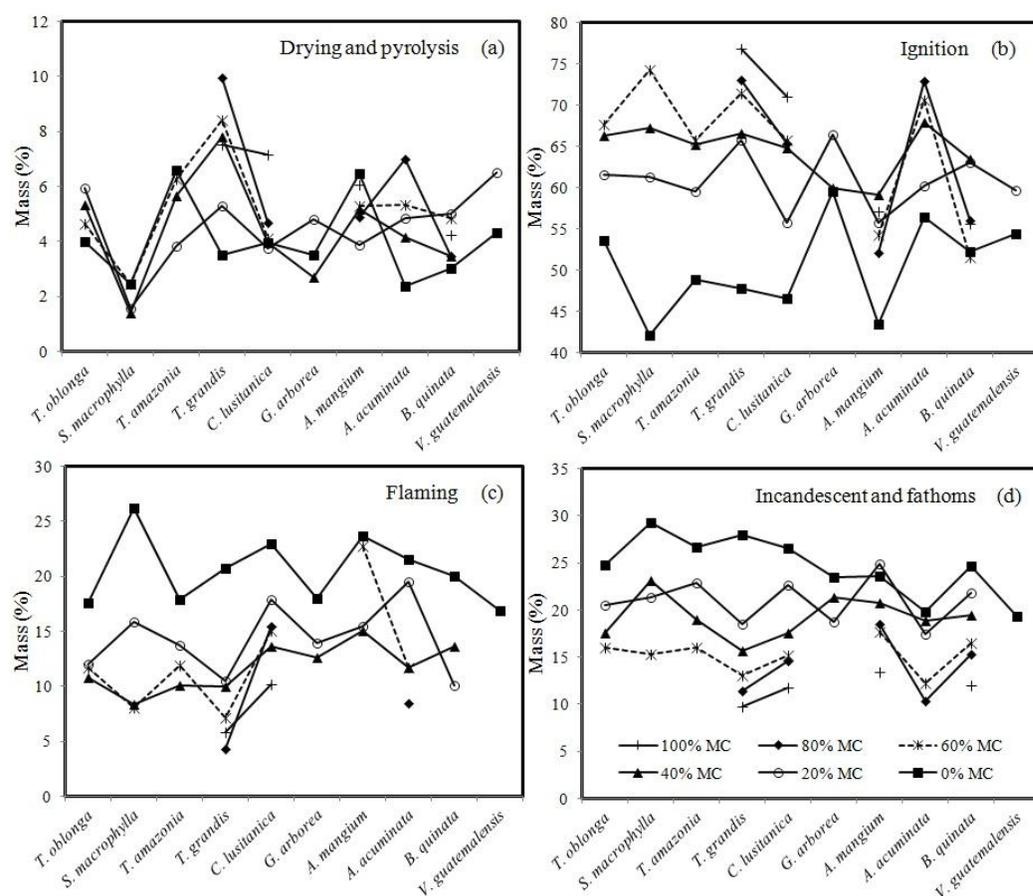


Figura 6. Masa consumida por etapa y contenido de humedad of ten fast-growth species in Costa Rica.

La etapa de secado y pirolisis es la etapa más constante del proceso de quemado, en esta se presentan menos variaciones en el porcentaje de masa entre especies y MC, además de ser la etapa de menor consumo de masa. Y por el contrario la etapa de ignición, es donde se presenta el mayor consumo de masa, y la mayor variación entre especies. Así mismo es

importante hacer notar que cuando se presentan bajos MC se presentan bajos consumos de masa, esto porque la masa que está siendo quemada corresponde al tejido leñoso, caso contrario a los MC altos, donde la pérdida de la masa en esta etapa está dada mayormente por la pérdida de agua. Es de esperar que cuando la madera presenta bajos MC en las etapas de fin de llama e incandescencia, se presente el mayor consumo de masa (Castro et al. 2007).

En el presente estudio se observó que la humedad es el principal factor que influye en el comportamiento de la combustión de las especies maderables de plantación. No obstante, otros factores también afectan la combustibilidad, como lo son la porosidad y otras características químicas y físicas, las cuales pueden afectar la pérdida de masa y la liberación de volátiles durante la combustión de la madera (Castro et al. 2007).

Conclusiones

Basados en los resultados de las pruebas de quemado y las curvas de TGA, se tiene que especies como *B. quinata*, *V. guatemalensis* y *G. arborea* son especies de mayor estabilidad térmica y con etapas del proceso de combustión poco definidas, lo que las hace menos aptas para un proceso de combustión. Por el contrario, las especies *T. grandis*, *S. macrophylla* y *C. lusitánica* poseen una estabilidad térmica menor, pero un proceso de combustión con etapas bastante definidas, lo cual hace que estas especies sean más aptas en procesos de combustión donde se necesite generar calor. En tanto que el resto de las especies *A. mangium*, *T. amazonia*, *A. acuminata* y *T. oblonga* son especies con propiedades de combustión aceptables que ofrecen los diferentes parámetros de combustión fácilmente identificables y estabilidad térmica moderada.

Para estas especies el contenido de humedad resultó ser el factor que tiene mayor influencia en el proceso de combustión y de estabilidad térmica de la madera. Sin embargo, existen otros factores también pueden tener algún grado de relación con estos procesos como lo son los extractivos, la porosidad y algunas características químicas y físicas.

Bibliografía

Gasparovic L, Korenova Z, Jelemensky L. 2010. "Kinetic study of wood chips decomposition by TGA". Chemical Papers. 64(2): 174-181.

Skkar. C. 1972. Water in Wood. 1 ed. Syracuse University Press. Syracuse. 218 p.

Ozgur. E; Falcone Miller. S; Miller. BG; Versan Kok. M. 2012. Thermal analysis of co-firing of oil shale and biomass fuels. Oil Shales 29(2): 190-201.

Abdullah. SS; Yusup. S; Ahmad. MM; Ramli. A; Ismail. L. 2010. Thermogravimetry study on pyrolysis of various lignocellulosic biomass for potencial hydrogen production. International Journal of Chemical and Biological Engineering. 3(3):137-141.

Demirbas. A. 2004. Combustion characteristics of different biomass fuels. Progress in Energy and Combustion Science 30: 219-230.

SAS INSTITUTE. SAS/STAT®: user's guide: version 6.08. Carrey, 1997. v.2, 846p.

Offerman R. Seidenberger T. Thrän D. Kaltschmitt M. Zinoviev S. Miertus S. Assessment of global bioenergy potenciales. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 2011; 16: 103-15.

Castro. A; Costa. FS. 2007. Drying and burning characteristics of ipe branco Wood cylinders. *Thermal Engineering*. 6(1): 35-40.

Browne. FL. 1958. Theories of the combustion of wood and its control. A survey of the literature. U.S. Forest Prod. Lab. Rep. 2136. 59pp. Madison .Wis.

Ramiah. MV. 1970. Thermogravimetric and differential thermal analysis of cellulose. hemicellulose. and lignin. *Journal of applied polymer science* 14: 1323-1337.

Islam. S; Hamdan. S; Rahman. R; Jusoh. I; Ahmed. AS; Idrus. M. 2011. Dynamic youngs modulus. morphological. and thermal stability of 5 tropical light hardwoods modified by benzene diazonium salt treatment. *BioResources* 6(1): 737-750.

Poletto. M; Dettenborn. J; Pistor. V; Zeni. M; Zattera. AJ. 2010. Materials produced from plant biomass. Part I: evaluation of thermal stability and pyrolysis of wood. *Materials Research* 13(3): 375-379.

TAPPI. Technical Association of the Pulp and Paper Industry, US. Tappi T 222 om-02 revised 2002. Standart test for acid-insoluble lignin in wood and pulp. Parkway South Norcross, US, TAPPI. 2002.

Seifert, K. Zur frage der Cellulose-Schnellbestimmung nach der Acetylaceton-Methode. *Das Papier* 1960; 14: 104-06.

ASTM. American Society for Testing and Materials. D 143-94 Standard test methods for small clear specimens of timber. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia. US. ASTM. Vol. 04.10. 2003a.

ASTM. American Society for Testing and Materials. 2003b. D-4442-92. Standard test methods for direct moisture content measurements of wood and wood-Base materials (Reproved 2003).

ASTM. American Society for Testing and Materials. D 5865-04 Standard test method for gross calorific value of coal and coke. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 04.10. 2003c.

ASTM. American Society for Testing and Materials. D-1110-84 Standard test method for water solubility of wood. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 2003d.

ASTM. American Society for Testing and Materials. D-1109-84 Standard test method for 1% sodium hydroxide solubility of wood. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 2003e.

ASTM. American Society for Testing and Materials. D-1107-84 Standard test method for ethanol-toluene solubility of wood. In *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 2003f.

ASTM. American Society for Testing and Materials. D-1108-96 Standard test method for dichloromethane solubles in wood. In Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, US, ASTM. Vol. 11.06. 2003g.

Shebani, AN; Van Reenen, AJ; Meincken, M. 2008. The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. *Thermochimica Acta*. 471: 43-50.

Berndes, G; Hoogwijk, M; Van den Broek, R. 2003. The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass and Bioenergy* 25(1): 1-28.

Kumar Jain, R. 1992. Fuelwood characteristics of certain hardwood and softwood tree species of India. *Bioresource Technology* 41: 129-133.

Nimmo, W., Daood, S.S., Gibbs, B.M.,” The effect of O₂ enrichment on NO_x formation in biomass co-fired pulverised coal combustion”, *Fuel*, 89: 2945-2952 (2010)

Wielage, B; Lampke, Th; Mark, G; Nestler, K; Starke, D. 1999. Thermogravimetric and differential scanning calorimetric analysis of natural fibers and polypropylene. *Thermochimica Acta* 337:169-177.

ANEXO 4: Tenorio, C; Moya, R. 2012. Difusión del agua en astillas de madera de 10 especies de plantaciones forestales en Costa Rica.

Difusión del agua en astillas de madera de 10 especies de plantaciones forestales en Costa Rica

Resumen

En la madera como fuente de energía es importante conocer el coeficiente de difusión (D) del agua dentro de la misma con el fin de conocer su comportamiento durante el secado. De ahí que el objetivo del presente estudio fue determinar el D de astillas de madera de distintas dimensiones para 10 especies de plantaciones forestales de rápido crecimiento en Costa Rica y conocer el efecto del peso específico básico (PE) y del contenido de humedad (CH) sobre D . Los resultados obtenidos señalan que el tiempo de secado de las astillas está relacionado con el tipo de madera (albura o duramen), con el CH que presenten las especies, y con los largos de las astillas. En la madera de *Gmelina arborea* y *Tectona grandis* con presencia de albura y duramen se presentó un D mayor en el duramen. En especies con altos CH , sobre 120%, como *Acacia mangium*, *G. arborea* y *Vochysia guatemalensis* se dan los tiempos de secado más altos. Las astillas de 10 cm de largo son las que presentan las pérdidas de humedad más lentas, seguidas de las astillas de 7 cm y finalmente con pérdidas de humedad más rápidas las astillas de 5 cm de largo. Así mismo se observó, que el coeficiente de difusión de las especies está relacionado positivamente con el CH y negativamente con el PE . Para *G. arborea* no se presentó relación de D con el PE y además no presentó una tendencia definida de D con el largo de las astillas.

Palabras clave: tiempo de secado, contenido de humedad, peso específico.

Introducción

Especies de relativo rápido crecimiento (con períodos de rotación de menos de 25 años), como *Terminalia amazonia*, *Terminalia oblonga*, *Vochysia guatemalensis*, *Bombacopsis quinata*, *Alnus acuminata*, y *Swietenia macrophylla* (especies nativas) y *Tectona grandis*, *Cupressus lusitanica*, *Acacia mangium* y *Gmelina arborea* (especies exóticas), han demostrado excelentes crecimientos en plantaciones forestales (Moya 2004, Murillo et al 2001, Pérez et al 2001, Petit et al 2004). Sin embargo, en los procesos de transformación y aserrío de estas maderas se genera una enorme cantidad de residuos que pueden ser usados como fuentes de energía renovables (Pang et al 2006, Velázquez 2006, Andersen et al 2005, Offerman et al 2011).

La utilización de estos residuos como material energético presenta muchas ventajas. No obstante, es importante indicar que una de las limitantes más grandes a las que se enfrenta este material es que en el caso de Costa Rica no se cuenta con un proceso industrial que verdaderamente haga utilización de los mismos (Ulloa et al 2004). Para dar una utilidad a los residuos forestales en fuentes de energía calórica es necesario que

estos se encuentren secos o con bajos contenidos de humedad, proceso que se lleva a cabo por el secado.

Durante el secado de los materiales, el agua se mueve a través de la madera por medio de: (i) cavidades celulares, lúmenes, puntuaciones y espacios intercelulares y (ii) atravesando la pared celular por la difusión (Siau 1971, Kang et al 2008). Este movimiento del agua está limitado por algunos factores intrínsecos de la madera entre los que destaca, su peso específico, tamaño y distribución de los elementos celulares y sus dimensiones, entre otras características propias de la madera (Mouchot et al 2006, Kang et al 2008). Por otro lado, el agua se presenta en dos formas: atada y libre. El agua atada es el agua que es absorbida en las paredes celulares, mientras que el agua libre, es el agua que se encuentra en los lúmenes o en las cavidades celulares (Siau 1971). Cuando la humedad es baja y únicamente se encuentra ligada a las paredes celulares de las fibras (punto de saturación de la fibra), el flujo de la humedad se da por difusión, en el caso contrario cuando el agua se encuentra libre el movimiento se da por capilaridad (Skaar 1972, Danvind et al 2006).

Una forma de conocer el movimiento del agua en la madera es a través de su coeficiente de difusión, que describe la velocidad de movimiento de la humedad (libre y atada) a través de la madera, es decir, determina la dificultad con la que se mueve la humedad a través de la misma (Li et al 2005). En muchas operaciones industriales es importante conocer el coeficiente de difusión de la madera, específicamente en procesos relacionados con el secado de la madera (Cai 2005). Así mismo el coeficiente de difusión ofrece una forma útil para estimar el tiempo de secado de piezas con contenidos de humedad bajo el punto de saturación de la fibra (Cai 2005, Simpson 1993).

Muchos autores señalan que el comportamiento de la difusión de la madera o coeficiente de difusión depende de los patrones de corte (Moya et al 2009, Mouchot 2000), de las características anatómicas (Tarmian et al 2012), de las condiciones ambientales (Simpson 1993), del contenido de humedad (Cai 2005, Simpson 1993), de la presencia de albura y duramen (Moya et al 2009, Rosenkilde y Glover 2002) y principalmente del peso específico (Tarmian et al 2012). Moya et al (2009) determinaron en la madera de *Gmelina arborea* que los coeficientes de difusión en sentido longitudinal y tangencial del duramen son más lentos que los coeficientes de difusión en sentido radial y que a su vez los diferentes cortes en madera de duramen presentaron coeficientes más bajos que los cortes de la madera de albura. Así mismo Simpson (1993) demostró que los coeficientes de difusión aumentan en forma exponencial con el contenido de humedad, esto significa que especies de altos contenido de humedad presenta altos coeficientes de difusión de agua. Del mismo modo diversos autores han demostrado que el coeficiente de difusión tiende a aumentar conforme se incrementa la temperatura (Stamm 1959, Hukka 1999, Danvind et al 2006).

La mayoría de estos estudios se han llevado a cabo para determinar los coeficientes de difusión que posee la madera aserrada a la cual se le va a aplicar un proceso de secado (Li et al 2005, Danvind et al 2006), sin embargo, existe muy poca literatura orientada a determinar los tiempos de secado y los coeficientes de difusión para astillas de madera utilizadas como fuentes energéticas. Por ejemplo Boszko et al (2007) utilizaron un secado convectivo de alta temperatura para secar astillas de madera y encontraron que los estudios de este tipo se basan en determinar diversas formas de secado para las astillas.

De forma tal que el presente estudio tiene como objetivo determinar el coeficiente de difusión de astillas de madera de distintas dimensiones (5 cm, 7 cm, 10 cm de largo por 4,5 cm, 6,3 cm y 10 cm de ancho), de 10 especies de plantaciones forestales de rápido crecimiento en Costa Rica. Así como conocer el efecto del peso específico básico y del contenido de humedad sobre el coeficiente de difusión en estas especies. Estos resultados permitirán optimizar los tiempos de secado necesarios para utilizar estas astillas como fuentes energéticas.

Metodología

Material utilizado y muestreo

Diez especies de plantaciones forestales de rápido crecimiento de Costa Rica fueron utilizadas. El rango de edades de las plantaciones fue de 6 a 21 años. La Tabla 1, presenta la densidad y las condiciones dasométricas de las plantaciones. Tres árboles fueron seleccionados con un diámetro cercano al promedio de cada plantación. Los árboles muestreados presentaban buena forma y estaban libres de daños de ataques de insectos u hongos. De cada árbol fue cortada una troza de 1,25 metros en la base del árbol hasta la altura del pecho (DAP) y esta fue pintada en sus extremos con el fin de disminuir la pérdida de humedad.

Tabla 1. Características dasométricas de las plantaciones utilizadas.

Especies	Tipo de madera	Edad (años)	Densidad (árboles/ha)	Altura total (m)	Diámetro (cm)	Peso específico	Contenido de humedad verde (%)
<i>Acacia mangium</i>	Duramen	6	800	11,89	17,87	0,37	192,62
<i>Alnus acuminata</i>	Albura	11	338	20,99	27,90	0,36	87,21
<i>Bombacopsis quinata</i>	Albura	14	265	22,58	36,99	0,32	173,33
<i>Cupressus lusitanica</i>	Duramen	18	400	17,60	33,65	0,42	83,49
<i>Gmelina arborea</i>	Albura Duramen	6	1000	15,90	20,60	0,39	112,68 142,60
<i>Swietenia macrophylla</i>	Duramen	21	21	9,49	18,15	0,54	72,50
<i>Tectona grandis</i>	Albura Duramen	9	509	14,99	20,50	0,49	121,80 144,79
<i>Terminalia amazonia</i>	Albura	12	378	18,54	21,48	0,51	71,12
<i>Terminalia oblonga</i>	Albura	20	221	14,35	23,48	0,60	59,52
<i>Vochysia guatemalensis</i>	Albura	10	641	21,83	23,07	0,26	188,66

Patrón de corte

En cada troza extraída del árbol fueron cortadas secciones transversales con espesores de 10 cm, 7 cm y 5 cm (Figura 1a), aproximadamente de 3-4 secciones de cada espesor. Seguidamente cada sección transversal fue cortada por la mitad, y luego en la sección de albura fueron extraídas 5 astillas para cada uno de los siguientes anchos, 10 cm, 6,3 cm y 4,5 cm y de 1 cm de espesor (Figura 1b), dimensiones correspondientes a los largos, anchos y espesores permitidos en la norma Standards– Specifications and properties for Wood chip de la unión europea (UNI CEN/TS, 2005). Así mismo en las especies que presentaron albura y duramen (*G. arborea* y *T. grandis*) fueron cortadas astillas de los dos tipos de madera e igualmente se obtuvieron 5 astillas de cada ancho y largo. Es importante mencionar que las astillas fueron cortadas con la ayuda de un cuchillo, colocado en la cara transversal y haciendo un corte en el sentido longitudinal, esto con el fin de obtener un corte similar al de una astilla de madera. La cantidad de astillas para cada tipo de madera fue de 135 unidades (3 árboles x 3 largos x 3 anchos x 5 muestras).

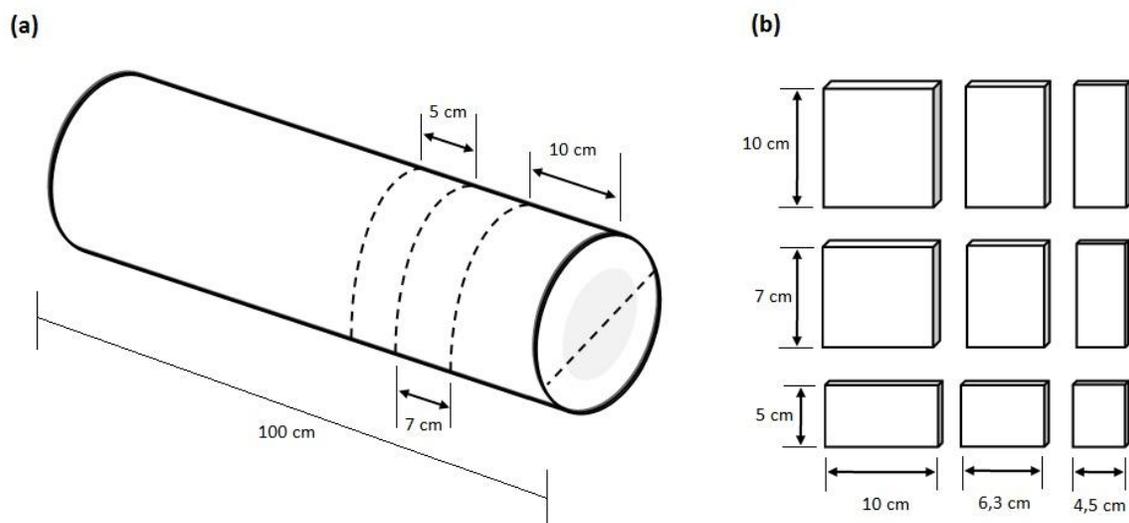


Figura 1. Patrón de corte utilizado para obtener astillas para la prueba de difusión (a), dimensiones de las astillas (b).

Determinación del contenido de humedad en verde y peso específico

El cálculo del contenido de humedad (CH) está referido la humedad que presenta la madera en el momento del corte, comúnmente denominado como humedad en verde y fue determinado en las astillas cortadas de las trozas (Figura 1b). Las astillas fueron pesadas en el momento del corte y cuando finalizó la prueba de difusión las astillas estas fueron colocadas por 24 horas en un horno de circulación de aire forzado a una temperatura de 103°C, acorde con la norma ASTM D-4442 (ASTM, 2003a). Finalmente se aplicó la ecuación 1. En la determinación del peso específico básico (peso seco/volumen verde) se utilizó la norma ASTM-143 (ASTM, 2003b). Para cada una de las propiedades de CH y peso específico (PE), se tomarán 135 muestras para la madera de albura y duramen, en el caso de que se presentaran estos dos tipos de madera.

$$\text{Contenido de Humedad (\%)} = \frac{(\text{Peso verde} - \text{Peso seco})}{\text{Peso verde}} \times 100 \quad (1)$$

Difusión de la humedad

Las astillas obtenidas en el muestreo (Figura 1b), fueron pesadas para determinar su peso verde o inicial, y posteriormente se colocaron dentro de un horno a temperatura de 75 °C, y fueron pesadas cada 60 minutos o cada 30 minutos, hasta obtener un peso constante. El primer rango de tiempo (60 minutos) fue aplicado en especies sobre 100% de humedad y el período más corto (30 minutos) se utilizó en las especies con CH inferior a 100%. Una vez obtenido este peso constante, el horno se programó a una temperatura de 103°C durante aproximadamente 12 horas para obtener el peso seco al horno. El coeficiente de difusión (D) fue calculado a 15% y utilizando la ecuación 2.

$$D = \frac{E_t^2 * \pi}{16 * t * L^2} \quad (2)$$

Donde: L es la longitud de la muestra en la dirección de transporte del agua (mm), t es el tiempo de secado (s) y E_t es el cambio relativo en el contenido de humedad de la madera de verde a seco (15% CH).

Análisis estadísticos

Se hizo un análisis descriptivo (media, desviación estándar, valores máximos y mínimos) para los coeficientes de difusión por dimensión de astilla y especie. Además, se verificó si las variables cumplían con los supuestos de la distribución normal, homogeneidad de las varianzas, así como la presencia de datos extremos. Primeramente se graficó la variación del CH en relación al tiempo. En dicha relación el valor de CH se transformó al logaritmo natural y el tiempo se mantuvo sin transformar. Fue usada dicha transformación con el fin de visualizar mejor las diferencias entre las diferentes dimensiones de las astillas. Posteriormente se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) para establecer la diferencia en los D de cada dimensión de astilla en cada una de las especies. Las diferencias entre medias se llevaron a cabo por el test de rango múltiple de tukey con una significancia de valor de $P < 0,05$. Así mismo se llevó a cabo un análisis de correlación entre el coeficiente de difusión, como variable dependiente, y el CH y PE , como variables independientes.

Resultados

Variación del contenido de humedad

Como era de esperar en todos los casos el CH disminuyó con el tiempo para todas las especies y diferentes dimensiones de astillas (Figura 2). Las astillas de 10 cm de largo en los diferentes anchos (4,5, 6,3 y 10 cm) son las que presentan las pérdidas de humedad más lentas, seguidas de las astillas de 7 cm de largo y finalmente con pérdidas de humedad más rápidas las astillas de 5 cm de largo (Figura 2). Únicamente el duramen de

G. arborea, presentó un comportamiento distinto, donde las astillas de 5 cm y 7 cm para el ancho de 10 cm, presentaron las pérdidas de humedad más lentas (Figura 1f). Con respecto a los anchos en las astillas, en ninguna de las especies se observó una tendencia clara en establecer cual ancho pierde humedad más rápidamente (Figura 2).

Otro resultado importante encontrado fue que especies como *A. mangium*, *G. arborea*, *V. guatemalensis* y *C. lusitanica*, requieren más tiempo para perder su humedad en relación al resto de las especies (*A. acuminata*, *B. quinata*, *S. macrophylla*, *T. grandis*, *T. amazonia* y *T. oblonga*). El primer grupo de especies necesitan de aproximadamente de 10 horas (Figura 2d, e, f, l), mientras que el otro grupo requiere de entre 8 y 10 horas (Figura 2a, b, c, g, h, i, j, k). Por otro lado *A. mangium*, *B. quinata* y *V. guatemalensis*, poseen los contenidos de humedad más altos ($\ln CH$ superior al 5%), y *A. acuminata*, *C. lusitanica*, *S. macrophylla*, *T. amazonia* y *T. oblonga*, los más bajos ($\ln CH$ inferior al 5%). En el caso de las especies que presentaron albura y duramen se observaron pequeñas diferencias entre los dos tipos de madera. Para el caso *G. arborea*, la madera de albura (10 horas) presentó una pérdida de humedad más rápida que la madera de duramen (más de 12 horas), además se observa que la madera de duramen ($\ln CH$ superior a 5% que corresponde a un valor de 143%) posee un CH más alto que la de albura ($\ln CH$ inferior a 5% que corresponde a un 113%) (Figura 2e, f). Para *T. grandis*, no se observaron diferencias en cuanto al tiempo de pérdida de humedad, ambas especies poseen un tiempo de más de 8 horas. Sin embargo, al igual que con las astillas de *G. arborea*, la madera de duramen (145%) posee un CH más alto que la de albura (122%) (Figura 2h, i).

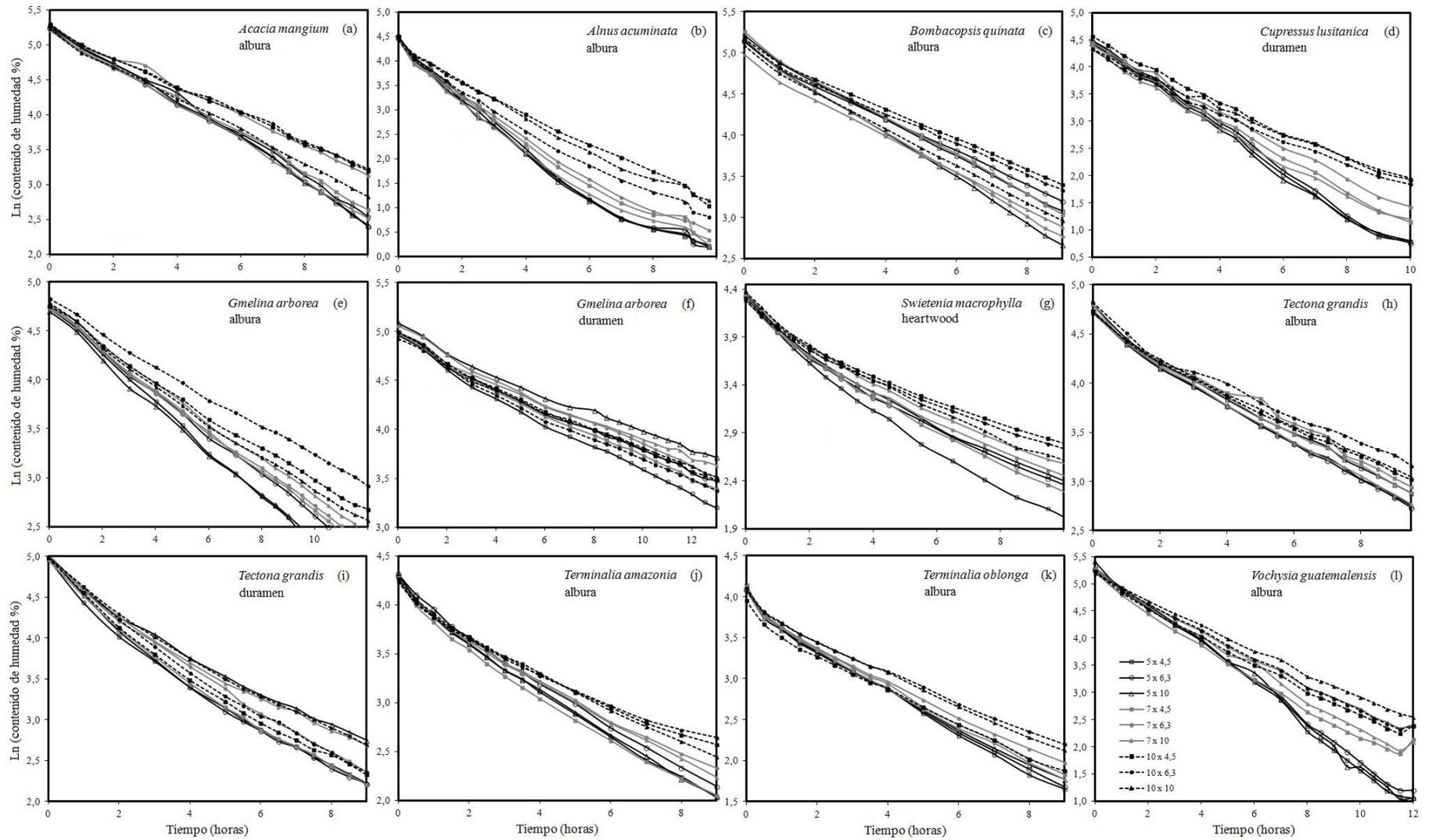


Figura 2. Variación del contenido de humedad en relación al tiempo de astillas de diferente dimensión para 10 especies de plantación.

Coeficientes de difusión

La figura 3 presenta los coeficientes de difusión (D) para cada una de las especies estudiadas y para cada tipo de astilla. *A. mangium* y *V. guatemalensis* presentan los coeficientes de difusión más altos con valores que van de 1504 a 2162 x 10⁻⁶ cm²/s, y de 1326 a 2790 x 10⁻⁶ cm²/s, respectivamente. Y por el contrario los coeficientes más bajos los presenta *S. macrophylla* con valores que van de 162 a 300 x 10⁻⁶ cm²/s, y *T. oblonga* con valores de 159 a 266 x 10⁻⁶ cm²/s. En el caso de las especies que presentaron albura y duramen, se tiene que: (i) en *T. grandis*, la madera de duramen obtuvo un D más alto que la madera de albura (Figura 3g) y (ii) en *G. arborea* no se observan diferencias entre los D de duramen y albura (Figura 3e).

En relación con la variación de D con los diferentes anchos y largos se encontró que en el caso de *B. quinata* y *S. macrophylla* no se presentó ninguna diferencia estadística entre los tres largos para cada tipo de ancho de astillas (Figuras 3c, f). En el resto de las especies (*A. mangium*, *A. acuminata*, *C. lusitanica*, *G. arborea*, *T. grandis*, *T. amazonia*, *T. oblonga* y *V. guatemalensis*) si se presentan diferencias entre en los largos para cada tipo de ancho (Figura 3). Se determinó que los D más altos se presentan para las astillas de 5 cm de largo, especialmente para los anchos de 6,3 cm y 10 cm.

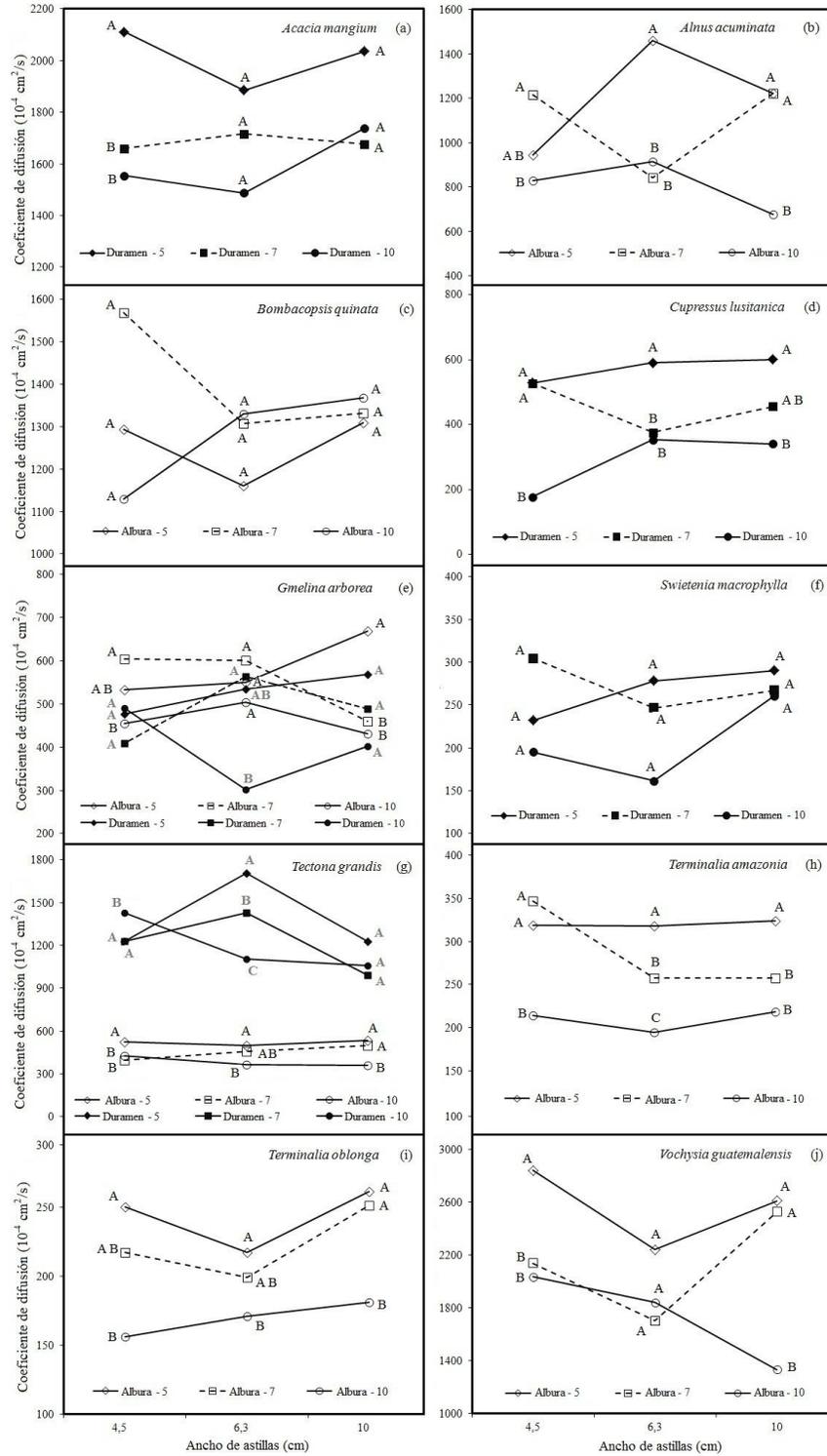


Figura 3. Coeficientes de difusión de las diferentes dimensiones de astillas para 10 especies de plantaciones forestales.
 Nota: letras diferentes para cada una de las características significan diferencias estadísticas a un 95%.

Relación entre Coeficiente de difusión con el contenido de humedad y el peso específico

Los datos de la tabla 2 señalan que la mayor cantidad de relaciones se presenta entre el *D* con el *CH* y por tanto la menor cantidad de relaciones se presentan entre *D* y el *PE*. Así mismo la relación entre *D* y el *CH* fue positiva en las distintas dimensiones de las astillas, y por el contrario, en el *PE* las relaciones son negativas en todas las especies estudiadas. Se observó que en la madera de *T. grandis* se presentó una relación estadísticamente significativa para todas las dimensiones de las astillas tanto con el *CH* como con el *PE*. Por el contrario, la madera de *G. arborea*, no presentó relación con el *PE* para ninguna astilla, pero sí con el *CH*. Así mismo se determinó que en la madera de *T. amazonia*, solo presentó una relación positiva con el *CH* para las astillas de 4,5 x 7 cm, y negativa con el *PE* para las astillas de 10 x 10 cm. En *B. quinata*, *C. lusitanica*, *S. macrophylla* y *T. oblonga*, fueron especies que se presentaron sobre 8 diferentes relaciones entre *D* y el *PE* o el *CH*. En tanto que el resto de las especies (*A. mangium*, *A. acuminata* y *V. guatemalensis*) la cantidad de relaciones fue menor a 6 (Tabla 2).

Tabla 2. Coeficientes de correlación entre el coeficiente de difusión, el contenido de humedad y el peso específico.

Especie	Ancho (cm)	Contenido de humedad			Peso específico		
		Largo de 5 cm	Largo de 7 cm	Largo de 10 cm	Largo de 5 cm	Largo de 7 cm	Largo de 10 cm
<i>Acacia mangium</i>	4.5	0.76**			-0.62*		
	6.3		0.68**			-0.56*	
	10		0.68**			-0.65**	
<i>Alnus acuminata</i>	4.5		0.70*	0.72**			-0.80*
	6.3		0.68*				
	10						
<i>Bombacopsis quinata</i>	4.5	0.58*	0.95**		-0.56*	-0.97**	
	6.3	0.58*	0.74**	0.63*		-0.82**	
	10	0.77**	0.76**	0.73**			
<i>Cupressus lusitanica</i>	4.5	0.92**	0.96**		-0.76*	-0.91**	
	6.3	0.98**	0.86*	0.98**			
	10	0.96**	0.96**	0.77**		-0.78**	-0.88**
<i>Gmelina arborea</i>	4.5	0.58*		0.80**			
	6.3	0.57*		0.60*			
	10		0.83**	0.66*			
<i>Swietenia macrophylla</i>	4.5		0.80*	0.82**			
	6.3	0.73*		0.79*		-0.77*	
	10	0.88**	0.88**	0.94**			
<i>Tectona grandis</i>	4.5	0.86**	0.80**	0.72**	-0.78**	-0.72**	-0.65**
	6.3	0.88**	0.86**	0.81**	-0.78**	-0.82**	-0.71**
	10	0.78**	0.87**	0.89**	-0.75**	-0.86**	-0.84**
<i>Terminalia amazonia</i>	4.5		0.55*				
	6.3						
	10						-0.69*
<i>Terminalia oblonga</i>	4.5	0.87**		0.71*	0.87**		-0.55*
	6.3	0.91**			-0.86**	-0.53*	
	10	0.85**	0.89**	0.78**	-0.92**	-0.92**	-0.83**
<i>Vochysia guatemalensis</i>	4.5	0.57*					
	6.3			0.71**	-0.70*		
	10	0.68**	0.79**			-0.81**	

Discusión

La reducción del CH con tiempo es matemáticamente explicada por una relación exponencial $Y = b \cdot e^{-a \cdot CH}$, donde a y b son constantes del modelo, Y es el tiempo de secado y CH el contenido de humedad de la madera (Souza et al. 1995). Esta relación es conocida como el modelo de Henderson and Pabis (Henderson et al. 1961). En todas las especies estudiadas se presenta este comportamiento, solo que con la finalidad de observar las diferencias entre las diferentes condiciones se linealizó el modelo (Figura 2). Las diferencias encontradas están relacionadas al tipo de madera (albura o duramen) y a las dimensiones de las astillas.

En relación al tipo de madera, se determinó que esta se encuentra relacionada a la pérdida de humedad con el tiempo. En la mayoría de las especies el duramen usualmente tiene CH más bajos que la madera de albura (Skaar 1972). Sin embargo, en las especies (*G. arborea* y *T. grandis*) que se presentaron ambos tipos de madera, se encontró que la madera de duramen presentó CH más altos que los medidos en la madera de albura (Tabla 1). Al presentar el duramen mayor cantidad de agua, se hace necesario de un mayor tiempo para la eliminación de esta de la astilla, de forma tal que el tiempo de eliminación de agua de la albura en *G. arborea* y *T. grandis* es menor que el durado en el duramen.

En relación con las dimensiones de las astillas, se tiene que los tiempos de pérdida de humedad más bajos se encontraron en las astillas más cortas (5 cm) a diferencia de los largos de 7 y 10 cm, pero, en relación con los anchos estudiados (4,5 cm, 6,3 cm y 10 cm) no se observó ningún tipo de influencia de estos en la pérdida de humedad (Figura 2). En cuanto a la influencia del espesor no se logró determinar la influencia ya que solamente se utilizó un espesor de 1 cm. El movimiento del agua dentro de una pieza de madera de forma rectangular se da más rápidamente en el sentido longitudinal, debido a que los elementos celulares de principal conducción se orientan en este sentido, posteriormente, el flujo de agua ocurre por el espesor de la pieza y finalmente por el ancho (Siau 1984, Skaar 1972, Siau 1971). De acuerdo a lo anterior, es poco factible que el movimiento del agua en los diferentes anchos de las astillas investigados tenga efectos importantes en la variación del secado de estas, de forma que se presentan pocas diferencias en los tiempos de secado, tal y como ocurrió en el presente trabajo (Figura 2). La geometría de la astilla utilizada, permite que la humedad busque salir por el espesor y no por el ancho, en el cual el agua tendría que pasar a través de las paredes celulares y por lo tanto el movimiento sería más lento (Skaar 1972).

Se ha señalado que altos CH inicial en las especies tienden a prolongar los tiempos de secado (Denig et al 2000, Tenorio et al 2012). Resultado encontrado en el presente estudio. Las especies de altos CH , como *A. mangium*, *G. arborea* y *V. guatemalensis*, presentaron los mayores tiempos de pérdida de humedad (Figura 2). No obstante, un resultado, poco esperado fue encontrado en *C. lusitanica* que presenta un CH de 87%, mucho más bajo que el de *A. mangium*, *G. arborea* y *V. guatemalensis* (Tabla 1), sin embargo, se observó que presenta un tiempo de secado también alto. Este mismo comportamiento fue observado por Moya et al. (2013) cuando estudiaron el secado de madera aserradera de estas especies. Este comportamiento de *C. lusitanica* puede ser explicado por el hecho de que se trata de una conífera, en las cuales el movimiento de la humedad dentro de la madera se realiza principalmente por los lúmenes de la traqueidas y las puntuaciones (Siau 1971) que por lo general presentan una velocidad de flujo de agua menor a las latifoliadas (resto de las especies estudiadas) ya que el flujo de agua ocurre por los lúmenes de los vasos y los lúmenes de las células (Siau 1971). Los lúmenes de las traqueidas son pequeños en relación con los lúmenes de los vasos, además en las puntuaciones en el duramen de las coníferas por lo general se encuentran aspiradas lo que no permite el flujo del agua (Siau 1971). Dichas

diferencias explican la diferencia encontrada entre el *C. lusitanica* y el resto de las maderas latifoliadas estudiadas.

El D además de aspectos intrínsecos de la madera varía con la temperatura a la cual es determinado (Siau 1971). Por ejemplo Mukam et al (2005) para la especie tropical de *Terminalia superba*, encontraron valores de $30500 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ con una temperatura de 30°C , valores inferiores a los reportados para las 10 especies de este estudio, con 75°C . La temperatura causa un incremento en D (Siau, 1971), lo que significa que al aumentar la temperatura a la cual se realizan las pruebas de difusión, se incrementan los valores de D , lo cual explica el hecho de que los D reportados en este estudio se han superiores, ya que la temperatura utilizada en este caso fue de 75°C .

Para las especies que presentan albura y duramen el comportamiento de D fue distinto. En el caso de *T. grandis*, el duramen presentó D más altos que los encontrados en la albura (Figura 3g), sin embargo en *G. arborea* (Figura 3e), esta diferencia nos es tan marcada como ocurre en *T. grandis*, probablemente por la presencia de sustancias tóxicas dentro de los lúmenes de los vasos que impiden el flujo de agua dentro de la madera (Moya et al. 2008).

Los valores de D nuevamente confirman que la pérdida de humedad se presenta más rápidamente en las astillas de 5 cm de largo, ya que este tipo de astilla presenta un valor de D más alto en los 3 anchos para la mayoría de las especies, tal como ocurrió en el tiempo de secado (Figura 2). Nuevamente este comportamiento es explicado por la disposición de los elementos celulares, de forma que en el sentido longitudinal se presenta un movimiento de agua mayor y el flujo del agua en este sentido es mayor en el largo de 5 cm, en comparación con los largos de 7 y 10 cm. Mukam et al. (2005), confirman estos resultados al determinar que el D longitudinal es de 10 a 15 veces mayor que el coeficiente de difusión tangencial, como consecuencia de que las cavidades celulares constituyen obstáculos difíciles de cruzar para las moléculas de agua.

La correlación encontrada entre el D y CH en cada una de las especies fue positiva en todos los casos (Tabla 3). Simpson (1993) demostró que los valores de D aumentan en forma exponencial con el CH , esto significa que cuando se presenta un alto CH presentan altos D . Esto puede ser explicado por el hecho que menos energía es requerida para desplazar y mover las moléculas de agua en altos CH , debido a su alto potencial de energía (Siau, 1971). También se observó una relación negativa con el PE , lo que significa que el D tiende a disminuir conforme aumenta el PE de las especies. Sin embargo esta relación no ocurrió en todas las especies. Por ejemplo en *T. grandis* fue posible observar que las variaciones de CH y PE dentro de la especie, están altamente relacionadas con el D sin importar las dimensiones de las astillas. Situación que no se presenta con *G. arborea*, donde únicamente el CH influye en los D . Otro ejemplo es el ocurrido en *T. amazonia*, en donde las variaciones del CH y el PE parecen no tener influencia en el D , ya que únicamente se presentó una relación positiva con el CH para las astillas de $4,5 \times 7 \text{ cm}$, y negativa con el PE para las astillas de $10 \times 10 \text{ cm}$. En el caso de *B. quinata*, *C. lusitanica* y *S. macrophylla* se puede decir que las variaciones del CH poseen una mayor influencia en el D , que el PE , ya que para estas especies la mayoría de las dimensiones de las astillas tuvieron una relación significativa del CH con el D , y no así con el PE . Contrario a *T. oblonga*, en la cual las variaciones en el PE afectan mayormente a los D . Para el resto de las especies *A. mangium*, *A. acuminata* y *V. guatemalensis*, la influencia tanto del CH como del PE en el D , fue muy baja, es posible que para estas especies, la difusión del agua se vea afectada por otro tipo de variables, tales como la presencia de puntuaciones y de radios que afectan el flujo del agua dentro de la madera (Siau 1971) y que no fueron investigadas en este estudio.

Conclusiones

Las diferencias encontradas en cuanto a los tiempos de secado de las astillas están relacionadas al (i) tipo de madera (albura o duramen), en las especies que presentaron ambos tipos de madera se encontró que el duramen requiere de un mayor tiempo para eliminar el agua que la madera de duramen, (ii) al CH, las especies de mayor CH (*A. mangium*, *G. arborea* y *V. guatemalensis*) presentaron los tiempos de secado más altos, y (iii) a las dimensiones de las astillas, las astillas de 5 cm de largo, perdían la humedad en forma más rápida que las de 7 cm y 10 cm, además no se presentó ningún tipo de relación del ancho en el tiempo de secado.

En relación con el *D*, este parámetro es relacionado con (i) las dimensiones de las astillas, las astillas de 5 cm de largo presentan coeficientes más altos en los 3 anchos, (ii) el CH, para la mayoría de las especies las variaciones del CH afectan positivamente el *D*, (iii) el PE, aunque en menor medida que el CH, el PE afectó negativamente el *D*. *T. grandis* fue la única especie donde el CH y el PE presentaron relación con el *D* para todas las dimensiones de astillas, caso contrario a *T. amazonia*, *A. mangium*, *A. acuminata* y *V. guatemalensis*, donde las variaciones del CH y el PE no parecen tener mayor influencia en el *D*. Especies como *G. arborea*, *B. quinata*, *C. lusitanica*, *S. macrophylla* y *T. oblonga*, presentaron una mayor relación del CH con el *D*.

Referencias

Andersen R, Towers W, Smith P. Assessing the potential for biomass energy to contribute to Scotland's renewable energy needs. *Biomass Bioenerg* 2005; 29(2): 73-82.

ASTM. American Society for Testing and Materials. 2003a. D 4442-92. Standard test methods for direct moisture content measurements of wood and wood-base materials In Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia. US. ASTM. Vol. 04.10.

ASTM. American Society for Testing and Materials. 2003b. D 143-94 Standard test methods for small clear specimens of timber. In Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia. US. ASTM. Vol. 04.10.

Boszko, M; Malczewski, J; Grabarczyk, R. 2007. Convective drying of wood chips at high temperature. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 52(2): 61-62.

Cai, L. 2005. Determination of diffusion coefficients for sub-alpine fir. *Wood Science and Technology*. 39:153–162.

Danvind, J; Ekevad, M. 2006. Local water vapor diffusion coefficient when drying Norway spruce sapwood. *Wood Science Journal*. 52:125–201.

Denig, J; Wengert, EM; Simpson, WT. 2000. Drying hardwood lumber. Ed., USDA Forest Service, Forest Products Laborator, Madison, WI, USA. 138 p.

De Souza, A; Simpson, WT; Verril, SP. 1995. Laboratory test for grouping tropical species for kiln drying. *Wood Science and Technology*. 29: 353–362.

Henderson, SM; Pabis, S. 1961. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 6: 169–174.

Hukka, A. 1999. The effective diffusion coefficient and mass transfer coefficient of Nordic softwoods as calculated from direct drying experiments. *Holzforschung*. 53:534–540.

Kang, W; Kang, CW; Chung, WY; Eom, CD; Yeo, H. 2008. The effect of openings on combined bound water and water vapor diffusion in wood. *Journal of Wood Science*. 54:343–348.

Li, X; Zhang, B; Li, W; Li, Y. 2005. Research on the effect of microwave pretreatment on moisture diffusion coefficient of wood. *Wood Science and Technology*. 39:521–528.

Mouchot, N; Wehrer, A; Bucur, V; Zoulalian, A. 2000. Indirect determination of tangential and radial steam diffusivity of beech. *Annals Forest Science*. 57:793–801.

Mouchot, N; Thiercelin, F; Perre, P; Zoulalian, A. 2006. Characterization of diffusional transfers of bound water and water vapor in beech and spruce. *Maderas. Ciencia y tecnologia*. 8:139–147.

Moya, R. Wood of *Gmelina arborea* in Costa Rica. *New For* 2004; 28: 299-317

Moya, R; Muñoz, F. 2008. Wet pockets in kiln dried *Gmelina arborea* lumber. *Journal of Tropical Forest Science*. 22(3): 317-328.

Moya, R; Muñoz, F; Dragica, J; Berrocal, A. 2009. Visual identification, physical properties, ash composition, and water diffusion of wetwood in *Gmelina arborea*. *Canadian Journal of Forest Research*. 39: 537-545.

Moya, R; Ureña, E; Salas, C; Muñoz, F. 2013. Kiln drying defects presence and grouping of Wood from ten tropical species growing in fast-growth plantation. *Wood Material Science and Engineering*. Accepted.

Mukam, JA; Wanko; C. 2005. Experimental determination of the diffusion coefficients of wood in isothermal conditions. *Heat Mass Transfer*. 41: 977–980.

Murillo, O; Obando, G; Badilla, J; Sánchez S. *Perspectivas en las zonas altas de Costa Rica. Biocenosis* 2001; 15(1-2): 66-71.

Offerman R, Seidenberger T, Thrän D, Kaltschmitt M, Zinoviev S, Miertus S. Assessment of global bioenergy potentials. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 2011; 16: 103-15.

Pang S, Li J. BIGCC (biomass integrated gasification combined cycle) system for New Zealand: An overview and perspective. *New Zeal J For* 2006; 51(2): 7–12.

Pérez D, Kanninen M. Stand growth scenarios for *Bombacopsis quinata* plantations in Costa Rica. *Forests Ecol Manag* 2001; 177: 427-39.

Petit B, Montagnini F. Growth equations and rotation ages of ten native tree species in mixed and pure plantations in the humid neotropics. *Forests Ecol Manag* 2004; 199: 243-57.

Rosenkilde, A; Glover, P. 2002. High resolution measurement of the surface layer moisture content during drying of wood using a novel magnetic resonance imaging technique. *Holzforschung*. 56:312–317.

Siau, JF. 1984. *Transport processes in wood*. Springer, Berlin. 245 p.

Siau, JF. 1971. *Flow in wood*. Syracuse University Press, Syracuse, NY. 132 p

Simpson, WT. 1993. Determination and use of moisture diffusion coefficient to characterize drying of Northern red oak. *Wood Science and Technology* 27:409-420.

Skaar, C. *Water in wood*. Syracuse University Press, Syracuse, NY. 218 p.

Stam, AJ. 1959. Bound-water diffusion into wood in the fiber direction. *Forest Products Journal*. 9(1): 27-32.

Tarmian, A; Remond, R; Dashti, H; Perre', P. 2012. Moisture diffusion coefficient of reaction woods: compression wood of *Picea abies* L. and tension wood of *Fagus sylvatica* L. *Wood Science Technology*. 46:405–417.

Tenorio, C; Moya, R. 2011. Kiln drying of *Acacia mangium* Willd wood: considerations of moisture content before and after drying and presence of wet pockets. *Drying Technology*. 29: 1845-1854.

Ulloa JB, Weerd JH, Huisman EA, Verreth JAJ. Tropical agricultural residues and their potential uses in fish feeds: The Costa Rica situation. *Waste Manag* 2004; 24: 87-97.

Velázquez B. Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. *Ecosistemas* 2006; 15: 77-86 (in Spanish with abstract in English).

Wood Fuel Standards– Specifications and properties for Wood chip de la unión europea (UNI CEN/TS, 2008.