



PROGRAMA DE CONVERSIÓN DE DEUDA
DE HONDURAS FRENTE A ESPAÑA



Ingeniería en
Energías
Renovables

ESTUDIOS TECNOLÓGICOS DE LOS MATERIALES DENDROENERGÉTICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE CIENCIAS
FORESTALES



BCIE

ESTUDIOS TECNOLÓGICOS DE LOS MATERIALES DENDROENERGÉTICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

AUTOR:

DAGOBERTO ARIAS AGUILAR, Ph. D.
*COORDINADOR DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN
DENDROENERGÍA, TECNOLÓGICO DE COSTA RICA*

RECONOCIMIENTO TÉCNICO:

CÉSAR AUGUSTO ALVARADO
MARNIE AMADA GIRÓN

DICIEMBRE 2017

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	5
GENERALIDADES DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA.....	7
RESIDUOS FORESTALES.....	9
EL BIOCOMBUSTIBLE SÓLIDO.....	13
PROPIEDADES DE LA BIOMASA FORESTAL CON FINES BIOENERGÉTICOS.....	15
NORMAS Y ESTÁNDARES.....	15
ESTÁNDARES EUROPEOS.....	16
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS (CEN/TS).....	16
CEN (COMITÉ EUROPEO DE NORMALISATION): COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN.....	17
COMITÉ DE LA ISO (ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN) – COMITÉ INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN.....	17
UNIDADES DE MEDIDA Y FACTORES DE CONVERSIÓN.....	17
MEDIDAS DE VOLUMEN Y PESO.....	19
DEFINICIONES MÁS IMPORTANTES PARA EL ANÁLISIS DE LOS MATERIALES DENDROENERGÉTICOS.....	19
INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL PODER CALORÍFICO.....	20
SELECCIÓN DE LOS TIPOS DE MADERA PARA GENERAR ENERGÍA.....	21
MATERIA PRIMA PARA PROCESAR.....	21
MADERA EN ROLLO PARA PRODUCIR ENERGÍA.....	21
MADERA PROCEDENTE DE CULTIVOS FORESTALES DE CORTA ROTACIÓN.....	22
RESTOS FORESTALES.....	23
MADERA DE PODAS Y ARBORICULTURA.....	23
RECORTES DE MADERA EN LA INDUSTRIA.....	23

PROTOSCOLOS RECOMENDABLES PARA EL ANÁLISIS DE LOS PRODUCTOS DE LA BIOMASA DENDROENERGÉTICA.....	25
MUESTREO, PREPARACIÓN DE LA MUESTRA, SUBMUESTREO.....	25
EN 14778:2011 BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS - MUESTREO.....	25
PROPIEDADES DE LA BIOMASA FORESTAL CON FINES BIOENERGÉTICOS	27
PRINCIPALES PROPIEDADES A CONSIDERAR EN TODO ANÁLISIS DE BIOMASA SÉGUN LAS ESPECIES	27
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MADERA Y CORTEZA.....	28
DESCRIPCIÓN DE RUTINAS DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DEL MATERIAL DENDROENERGÉTICO.....	31
PROPIEDADES FÍSICAS	31
COMPOSICIÓN QUÍMICA	32
COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LA BIOMASA.....	32
ELEMENTOS DE MAYOR ABUNDANCIA.....	32
ELEMENTOS QUE TIENEN EFECTOS SOBRE LA COMBUSTIÓN.....	33
ELEMENTOS CON INFLUENCIA SOBRE LA CORROSIÓN Y/O EL MEDIO AMBIENTE	33
ELEMENTOS MAYORITARIOS EN LAS CENIZAS DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASAS.....	33
ELEMENTOS MINORITARIOS EN LAS CENIZAS DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASAS	34
EL ANÁLISIS QUÍMICO	34
PH Y SOLUBILIDAD A LA SOSA	35
CONTENIDO DE CENIZAS Y MICROANÁLISIS DE CENIZAS	36
EXTRACTOS, LIGNINA, HOLOCELULOSA Y ALFA-CELULOSA.....	37
PODER CALORÍFICO	39
ESTUDIOS DEL EFECTO DE DIFERENTES FACTORES (ESPACIAMIENTOS, ESPECIES, EDADES Y SITIOS).	41
PRUEBAS DE LABORATORIO APLICABLE A LA BIOMASA SEGÚN NORMAS ESTANDARIZADAS	41
ESTADO DE SITUACIÓN.....	41
PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN.....	43
BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA.....	49



INTRODUCCIÓN

Los países que están en proceso de desarrollo económico como instrumento para el mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes, dependen del uso de la energía como factor de la producción y desarrollo. En los momentos actuales se tiene claramente establecida una creciente demanda de energía a nivel mundial, pero también para la inmensa mayoría de los países, la incertidumbre sobre las reservas de combustibles, el incremento de las emisiones de gases efecto invernadero y el factor de precio de producción de energía. Lo anterior, ha propiciado el interés cada vez mayor en el desarrollo de fuentes alternativas de energía, que además ofrezcan beneficios ambientalmente sustentable. El aprovechamiento de los residuos biológicos de distintas procedencias pueden ser una fuente importante de energía mediante su transformación con tecnologías existentes

La biomasa, como material originado en un proceso biológico, puede ser utilizada para producir energía. Los sistemas agrícolas y forestales son grandes productores de biomasa. Una parte de ésta es utilizada para procesos industriales (alimentarios o madereros), mientras que otra parte es considerada como residuo, el cual actualmente no es aprovechado para la generación de bioenergía.

Los residuos forestales derivados de actividades silvícolas y aprovechamientos madereros no son utilizados de forma eficaz debido a que presentan dificultades técnicas y económicas en su extracción, transporte, selección y transformación así como falta de información sobre la cantidad y calidad de estos residuos. Adicionalmente, el sector forestal tiene un gran potencial para la producción de biomasa mediante modelos de suministro de biomasa a través de plantaciones de alta densidad o también denominadas plantaciones dendroenergéticas.

El uso de los residuos forestales y de materiales bioenergéticos y el precio que tienen en el mercado, depende en gran medida de las características que presentan. Cuando el aserrín y corteza presentan un contenido de humedad igual o mayor a 140% en base seca, propicia que en la mayoría de los casos el material sea dispersado por el área de cosecha, otras ocasiones se depositan en vertederos y eventualmente se trituran o queman para reducir el volumen. El abandono de estos materiales en la superficie de las plantaciones o bosques supone un alto impacto ambiental, debido a la lenta descomposición que pueda tener el elevado volumen de biomasa sobrante y en época de calor puede sufrir un secado suponiendo focos con alto riesgo de incendio, particularmente en el caso de las coníferas.

Otro aspecto a considerar durante la comercialización de los productos como el aserrín, las astillas y la corteza son los costos de transporte, que tiene relación con la distancia entre el productor y el centro de utilización, en donde el costo por transporte, es mucho mayor que su precio de venta final. La problemática del volumen del material se intenta resolver al

manufacturar productos como los pellets y las briquetas, que durante su proceso densifica el aserrín para minimizar el volumen de residuos transportados.

La industria forestal por su parte, genera grandes volúmenes de residuos durante el proceso de aprovechamiento hasta la obtención del producto final. Se calcula que los residuos son el 28% del volumen de la madera de los aprovechamientos forestales medidos en metros cúbicos con corteza. El aprovechamiento energético de los residuos forestales derivados de actividades silvícolas como podas y aclareos, a veces no rentables económicamente, supone un manejo integral de las masas forestales. Más recientemente, el establecimiento de plantaciones dendroenergéticas proporciona material proveniente de fustes y ramas de árboles de corta edad (12-36 meses). En todos estos casos, conocer la composición química de las diferentes estructuras que conforman las especies maderables es un aspecto importante y necesario para encontrar alternativas de aprovechamiento de los beneficios económicos que los residuos proporcionan para las diferentes industrias.

Para determinar las principales características energéticas de los materiales dendroenergéticos, se deben considerar las variables físicas y químicas que los definen. Las características químicas de la madera que más influyen en su comportamiento como biocombustible son la composición química elemental, la composición química por compuestos y el poder calorífico. Por lo anterior, conocer las principales variables que condicionan el uso de la madera, fustes y corteza como biocombustibles, tales como el contenido de humedad, la densidad y las propiedades químicas de las especies maderables, es el primer paso para determinar su potencial como biocombustibles.

En este manual se describen los métodos de caracterización de los diferentes productos dendroenergéticos y que permiten ayudar a la toma de decisiones sobre factibilidad de los proyectos y el uso de tecnologías de transformación de la biomasa.

GENERALIDADES DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA

Desde un punto de vista muy práctico, el término biomasa comprende a las materias hidrocarbonadas, no fósiles en las que mediante el proceso básico de la fotosíntesis se ha producido la reducción y fijación de CO₂ en los tejidos vegetales. Las plantas almacenan la energía en forma de carbohidratos (azúcares), lignina y celulosa. Durante la fotosíntesis las plantas usan la luz solar para combinar el dióxido de carbono del aire y el agua del suelo para formar carbohidratos los cuales son la estructura elemental de la biomasa. La madera, las ramas y la corteza están formadas químicamente por polisacáridos y lignina, además de sustancias inorgánicas. Aun cuando las cantidades de los componentes varían entre las especies, los componentes químicos mayoritarios son los carbohidratos y lignina y, en pequeñas cantidades los extractivos (Cuadro 1).

CUADRO 1: COMPOSICIÓN BÁSICA DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA.

COMPONENTE	BIOMASA LEÑOSA (%)
Celulosa	55-65
Hemicelulosa	10-20
Lignina	20-30
Extractivos	10-20
Cenizas	0.1-0.5

Una idea más clara de la composición los componentes de celulosa, hemicelulosa y lignina para las especies forestales de mayor importancia dendroenergética, se muestran en el Cuadro 2. Nótese los mayores contenidos de celulosa en la mayoría de las especies de eucalipto, o bien los altos contenidos de lignina en la teca.

CUADRO 2: COMPOSICIÓN BÁSICA DE CELULOSA, HEMICELULOSA Y LIGNINA PARA LAS ESPECIES DE USO DENDROENERGÉTICO EN AMÉRICA CENTRAL.

Especie forestal	Celulosa (%)	H-celulosa (%)	Lignina (%)	Referencias
<i>Cedrela odorata</i>	37	18	33	(Pettersen, 1984)
<i>Cordia alliodora</i>	45	17	30	(Pettersen, 1984)
<i>Cupressus lusitánica</i>	39 – 40	23	31 – 33	(Kropff, 2000)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	41 – 50	14 – 19	18 - 34	(Kropff, 2000)
<i>Eucalyptus globulus</i>	45	23	27	(Kropff, 2000)
<i>Eucalyptus grandis</i>	41,2	28,3	23,2	(Kropff, 2000)
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	45 – 48	11 – 23	22 – 30	(Kropff, 2000)
<i>Eucalyptus urophylla</i>	19	24	17	(Pettersen, 1984)
<i>Gmelina arbórea</i>	47	20	29	(Pettersen, 1984)
<i>Pinus caribaea</i>	48,06	18,95	29,51	(Mogollón, 2003)
<i>Pinus kesiya</i>	37 – 43	14 - 28	28	(Kropff, 2000)
<i>Pinus maximinoi</i>	52,38	---	28,22	(Fonseca, 2006)
<i>Pinus oocarpa</i>	42	23	29	(Kropff, 2000)
<i>Pinus patula</i>	48,75	32,75	18,5	(Uribe, 1967)
<i>Pinus radiata</i>	37,88	23,62	33,72	(Berrocall, 2004)
<i>Schizolobium parahibum</i>	49	14	26	(Pettersen, 1984)
<i>Tectona grandis</i>	33	40	35	(Pettersen, 1984)

La biomasa rica en carbohidratos, principalmente glucosa, es adecuada para la generación de bioenergía. Actualmente, la combustión de biomasa es una de las principales fuentes de energía renovable, contribuyendo con poco más del 10% del suministro total de la energía primaria a nivel mundial, la cual es considerada neutral desde el punto de vista ambiental, en la emisión de CO₂ a la atmósfera. Además su uso genera oportunidades para el desarrollo social y el desarrollo económico en las comunidades rurales, y mejora la gestión de los recursos y de los residuos (Figura 1).



FIGURA 1: MODELO FORESTAL DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA PARA ENERGÍA CON DIMENSIONES DE DESARROLLO ECONÓMICO, SOCIAL Y AMBIENTAL.

RESIDUOS FORESTALES

Actualmente en América Central, las fuentes más importantes de biomasa utilizable en energía son los campos agrícolas (bagazo de la caña de azúcar, residuos de la palma aceitera, cascarilla del arroz, podas y renovación de cítricos, cascarilla del café). La Figura 2 muestra un proceso típico de transformación del bagazo de la caña de azúcar en energía.

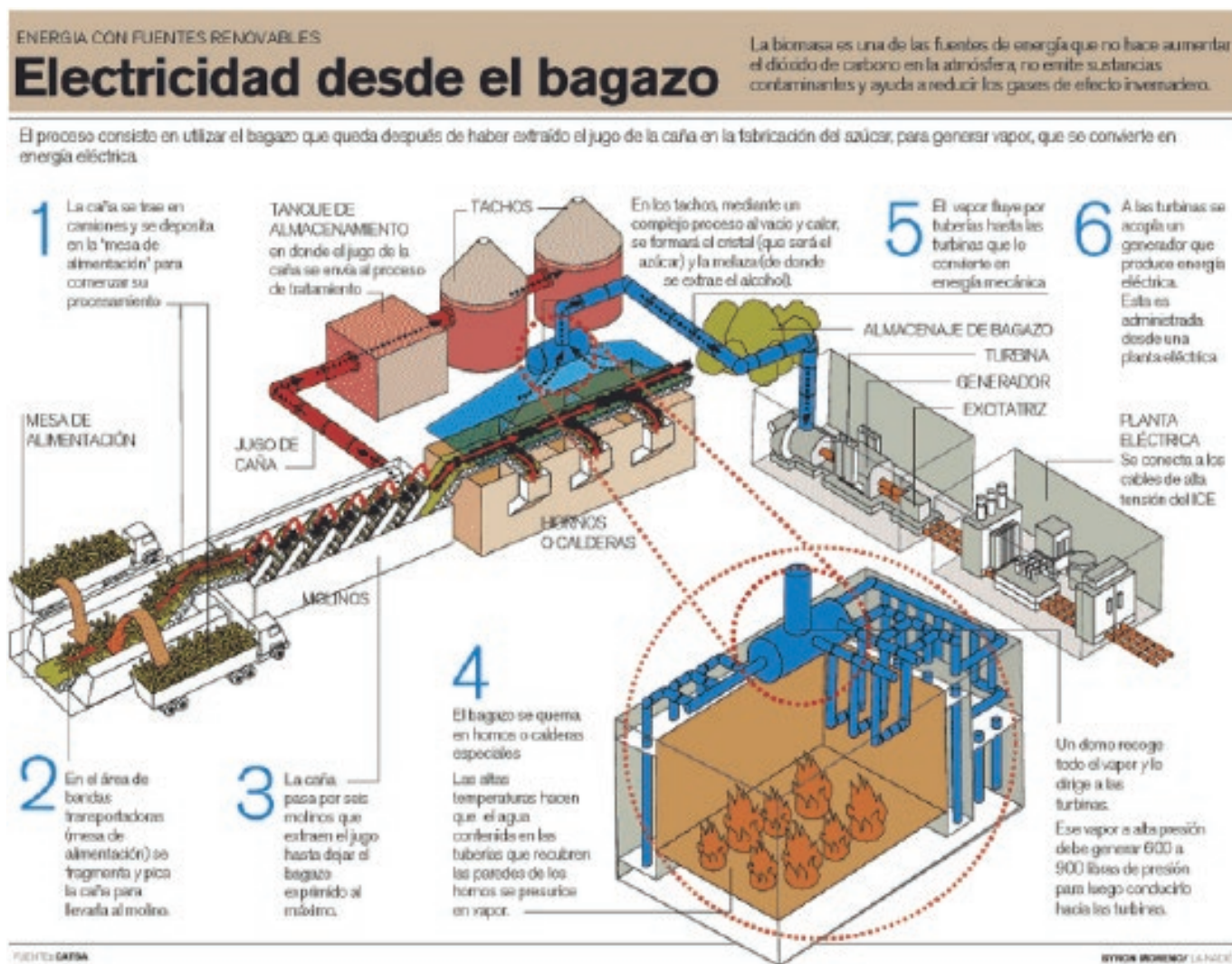


FIGURA 2: PROCESO TÍPICO DE TRANSFORMACIÓN DEL BAGAZO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN ENERGÍA ELÉCTRICA MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE CALDERAS DE VAPOR EXISTENTES EN LOS INGENIOS.

Seguidamente están los residuos forestales (aserrín, leña), siendo que todavía mucha de la biomasa producida normalmente queda en el campo sin transformación tecnológico. La Figura 3 ilustra un proceso típico de aclareo forestal en plantaciones de teca, en donde los residuos son dejados en el campo.



FIGURA 3: RESIDUOS DE PLANTACIONES DE TECA (*TECTONA GRANDIS*) QUE NO SON APROVECHADOS Y QUEDAN EN EL CAMPO.

La tercera fuente de biomasa son las plantaciones dendroenergéticas y estas se encuentran en etapa de desarrollo. La Figura 4 muestra un proyecto típico de plantaciones de alta densidad para la producción de energía.



FIGURA 4: *PLANTACIÓN DENDROENERGÉTICA DE EUCALIPTO PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA CON EL DETALLE DE PLANTACIONES ESTABLECIDAS AL FONDO Y NUEVAS PLANTACIONES AL FRENTE.*

Los residuos forestales, procedentes de actividades silvícolas y/o industrias forestales lo constituyen las ramas, los tocones (en aquellos casos de su utilización), la corteza, las astillas y el aserrín. Estos residuos, no están generalmente concentrados y ofrecen unas características heterogéneas muy variables de unos sistemas a otros al depender de condiciones no controladas como el clima, edafología y tipo de aprovechamiento. Por tanto, la utilización de estos residuos encarece las operaciones de obtención y abastecimiento, teniendo además que homogeneizar el material utilizable. Esta concepción requiere realizar una valoración de la biomasa forestal existente que permita una adecuada utilización como fuente de energía.

La variabilidad de los residuos forestales hace necesaria una adecuada caracterización para optimizar su uso y transformación (Figura 5).



FIGURA 5: DETALLE DE LOS RESIDUOS FORESTALES POSTERIOR AL APROVECHAMIENTO DE UNA PLANTACIÓN DE EUCALIPTO (MADERA, CORTEZA, RAMAS, HOJAS, TOCONES).



EL BIOCOMBUSTIBLE SÓLIDO

La biomasa forestal destinada a la obtención de energía es utilizada en dos formas diferentes, leña o astillas. El empleo de la leña y las astillas puede tener caminos diversos. Con el desarrollo industrial se ha retomado el óptimo aprovechamiento de los recursos lignocelulósicos. La necesidad de sustituir combustibles fósiles ha llevado a utilizar los residuos lignocelulósicos, ocupándolos directamente o procesándolos como material compactado en forma de pellets o briquetas (Figura 6). Estos elementos densificados presentan una serie de ventajas con respecto al material del que provienen, ya que su mayor densidad permite disminuir el costo de transporte y almacenamiento, además de ser productos más homogéneos en características y propiedades, más limpios, y mucho más fáciles de manejar. Los pellets de madera fueron inventados como una reacción a la crisis energética a finales de los años 70's en los Estados Unidos como un combustible alternativo. El propósito principal de pellets de madera fue para ayudar a resolver la crisis energética, utilizados por los sectores industrial, comercial e institucional para la calefacción



Leña

Astillas

Pellets

Briquetas



FIGURA 6: MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS TRANSFORMADOS EN LEÑA, ASTILLAS, PELLETS Y BRIQUETAS, TODAS ESTAS FORMAS SON LAS LÍNEAS DE UTILIZACIÓN DE LA BIOMASA PARA ENERGÍA.

El aserrín de coníferas es el material más comúnmente usado para la producción de pellets, la experiencia, indica que las propiedades de los diferentes biomateriales tienen influencia en la calidad final del combustible. Varios estudios demuestran por ejemplo que la corteza de pino es el más sustentable producto para fabricar pellet, pero necesita de un quemador específico debido a los diferentes comportamientos de la combustión de las mezclas.

Para obtener un biocombustible sólido las principales etapas de transformación realizables para el tratamiento de biomasa residual son fragmentación, secado y compactación, con el objetivo de facilitar la ignición y combustión del biocombustible, aumentar su poder calorífico al disminuir su humedad y aumentar la densidad y gastos de almacenaje al disminuir su volumen. Las transformaciones químicas dependen de las propiedades que contenga el material como su poder calorífico, la cantidad y composición de cenizas, composición química ya que estas propiedades afectan la combustión, así como, el diseño y rendimiento de los sistemas de combustión.



PROPIEDADES DE LA BIOMASA FORESTAL CON FINES BIOENERGÉTICOS

Las fuentes de materiales dendroenergéticos y los productos lignocelulósicos se pueden medir por su masa o peso, o incluso su volumen, pero el factor esencial es el contenido de energía de esas fuentes y productos. El valor de la energía se evalúa con respecto a parámetros energéticos, utilizando siempre unidades normalizadas (FAO, 1997). La estandarización de los biocombustibles está regulada por el conjunto de normas europeas CEN/TE 335, por la que se regulan terminología, descripción y especificaciones. La eficiencia de cada uno de los procesos posibles para la utilización de residuos forestales depende de ciertos parámetros característicos o propiedades clave que indican la aptitud de un combustible para un uso específico. Estas propiedades se indican en el Cuadro 2 junto con sus medidas en el Sistema Internacional.

NORMAS Y ESTÁNDARES

Al cumplir con un estándar, en principio las empresas tienen la posibilidad de obtener una ventaja sobre la competencia y de generar confianza entre los consumidores. La conformidad de los productos con la legislación vigente de cada país también se puede hacer constar a través del cumplimiento de los estándares. Por otro lado, aplicando los estándares es posible reducir los costos, por ejemplo, de los procesos de producción y de la simplificación de aquellos procesos comerciales en los que los estándares constituyan una base común entre vendedores y compradores. Así, en el ámbito del comercio de biomasa los estándares definen los métodos de evaluación y clasificación de la calidad de la biomasa a fin de que al comprador le resulte más fácil determinar si la biomasa y su precio son adecuados. A finales de los años noventa, la Comisión Europea le encargó al CEN la elaboración de estándares relativos a los biocombustibles sólidos que respaldaran la política energética europea, cuyo objetivo era favorecer la utilización de fuentes de energía renovables para contrarrestar los efectos del cambio climático (reducir las emisiones de gases de efecto invernadero) y fomentar la seguridad energética (reducir la dependencia de las importaciones de energía). En todos los países europeos existe una organización nacional de normalización. Estas organizaciones son miembros del CEN. Las organizaciones nacionales de normalización son las responsables de incluir al mayor número posible de actores de los grupos de interés respectivos en los trabajos a realizar en el marco de cada uno de los procesos de estandarización.

Es importante conocer que se han elaborado estándares de productos específicos para los combustibles de pellets de madera, briquetas, astillas / triturado, leña partida y agropellets que ya se han publicado como estándares europeos para su aplicación en ámbitos no industriales. El estándar relativo a la leña partida es el primero en su ámbito y su finalidad es ofrecer definiciones claras sobre el origen, la producción y la calidad a fin de que este combustible sea mejor aceptado por los clientes. Los combustibles con una calidad específica solo se pueden producir si los criterios a cumplir son conocidos y verificables y están aprobados. La principal ventaja del nuevo estándar de producto es la estructura de categorías de calidad claramente definidas y asignadas.

En Europa se tienen los siguientes estándares de producto para los siguientes tipos de combustible específicos:

FprEN ISO 17225-2: 2013 Biocombustibles sólidos – Especificaciones y clases de combustibles – Parte 2: Clases de pellets de madera

FprEN ISO 17225-3: 2013 Biocombustibles sólidos – Especificaciones y clases de combustibles – Parte 3: Clases de briquetas de madera

FprEN ISO 17225-4: 2013 Biocombustibles sólidos – Especificaciones y clases de combustibles – Parte 4: Clases de astillas de madera

FprEN ISO 17225-5: 2013 Biocombustibles sólidos – Especificaciones y clases de combustibles – Parte 5: Clases de leña

FprEN ISO 17225-6: 2013 Biocombustibles sólidos – Especificaciones y clases de combustibles – Parte 6: Clases de pellets no leñosos

FprEN ISO 17225-7: 2013 Biocombustibles sólidos – Especificaciones y clases de combustibles – Parte 6: Clases de briquetas no leñosas

ESTÁNDARES EUROPEOS

Un estándar es un documento técnico que sirve como norma, pauta o definición basada en acuerdos concluidos por grupos de interés. Los estándares europeos deben ser adaptados a estándares nacionales por los organismos reguladores nacionales.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS (CEN/TS)

Las especificaciones técnicas (TS, por sus siglas en inglés) son documentos de carácter normativo elaborados y aprobados por un comité técnico. Estas pueden servir como estándares provisionales e incluir requisitos técnicos de tecnologías innovadoras. Las especificaciones técnicas también resultan útiles si no es posible llegar a un consenso sobre un estándar común. Por ello tienen que convivir diversas especificaciones, las cuales pueden aplicar como estándares nacionales, aunque no es obligatorio.

CEN (COMITÉ EUROPEO DE NORMALISATION): COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN

Entre los años 2000 y 2006 se elaboraron diversas especificaciones técnicas (CEN/TS) en el Comité Técnico CEN/TC 335 de biocombustibles sólidos que posteriormente pasaron a ser estándares plenamente aceptados. La mayoría de estos estándares fueron publicados entre 2009 y 2012.

COMITÉ DE LA ISO (ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN) - COMITÉ INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN

El Comité Técnico ISO/TC 238 de biocombustibles sólidos fue creado en 2007 y su misión es apoyar el desarrollo de los mercados internacionales de biocombustibles sólidos. Multitud de estándares europeos ya publicados son utilizados como proyectos de estándar en el ISO/TC 238 y parcialmente desarrollados y debidamente complementados. Los primeros estándares en materia de biocombustibles sólidos serán publicados como ÖNORM EN ISO a partir de 2014. Con pocas excepciones, los estándares europeos vigentes serán sustituidos por los nuevos estándares. Esta reestructuración solo implicará ligeras modificaciones de los textos normativos, pero se asignarán nuevos números a los estándares. Adelantándonos a los acontecimientos futuros, en este manual nos referiremos a los números nuevos, aunque estos solo serán válidos una vez que el estándar respectivo haya sido oficialmente aprobado. Hasta entonces serán de aplicación los estándares europeos actuales.

UNIDADES DE MEDIDA Y FACTORES DE CONVERSIÓN

Metro cúbico sólido: El metro cúbico sólido (mcs) es una unidad de medida equivalente a un metro cúbico de madera sólida sin espacios de aire aplicada a la madera en rollo antes de ser procesada (serrado, astillado, rajado, etc.). Esta unidad de medida es utilizada para productos de madera en rollo.

Metro cúbico: El metro cúbico (mc) es una unidad de medida de madera acabada con espacios de aire (cavidades) con un volumen total de un metro cúbico. Se suele aplicar a la leña (leña, trozas, trozos de madera y tablas).

Metro cúbico aparente de astilla: El metro cúbico aparente de astilla (map) es unidad de medida de madera astillada y apilada con un volumen total de un metro cúbico incluidos espacios de aire (cavidades). Se aplica a las astillas y al serrín, así como a la leña y productos similares.

Masa absoluta seca: La masa absoluta seca (mas) es una unidad de medida equivalente al peso de una tonelada de masa de madera completamente seca (masa de madera con un contenido de agua del 0%). Para utilizar correctamente esta unidad de medida se necesitan equipos técnicos especiales y muestreos estandarizados.

mc_{ss}: metro cúbico sólido medido y cargado sin corteza.

mc_{scs}: metro cúbico sólido medido con corteza y cargado sin corteza.

mc_{sc}: metro cúbico sólido medido y cargado con corteza.

La madera que proviene del uso de la biomasa forestal (leña, astillas) se suele medir con corteza. En la tabla siguiente se incluyen los factores de conversión promedio entre metro cúbico sólido, metro cúbico y metro cúbico aparente. Se trata de valores aproximados que pueden variar en función de las especies, el acabado, la clasificación y la compactación de la madera.

mac: tonelada de masa absoluta seca medida y cargada con corteza.

mac_s: tonelada de masa absoluta seca medida con corteza y cargada sin corteza.

CUADRO 3: FACTORES DE CONVERSIÓN PARA PRODUCTOS PROVENIENTES DE LA BIOMASA FORESTAL.

	Madera en rollo	Leña	Trozas		Astillas	
			apiladas	amontonadas	finas	gruesas
	[mcs]	[mc]	[mc]	[map]	[map]	[map]
1 mcs de madera en rollo	1	1,4	1,2	2	2,5	3
1 mc de leña lista para estufa-hogar de 1 m de largo, procesada	0,7	1	0,85	1,4	1,8	2,15
1 mc de trozas listas para estufa-hogar procesadas	0,85	1,2	1	1,67	2	2,5
1 map de trozas listas para estufa-hogar procesadas	0,5	0,7	0,6	1	1,25	1,5
1 map de astillas finas	0,4	0,55	0,5	0,8	1	1,2
1 map de astillas gruesas	0,33	0,47	0,4	0,67	0,85	1

MEDIDAS DE VOLUMEN Y PESO

Para obtener una medida de volumen a partir de una medida de peso se pueden realizar cálculos con los valores de densidad conocidos. La densidad de la madera puede variar considerablemente entre los distintos tipos y también dentro de un mismo tipo de madera. Esto se debe a varios factores. Las variaciones pueden deberse a variables como la genética, la edad, la ubicación y la posición. Así pues, todos los datos relativos a la densidad de la madera son valores aproximados. Las posibles fluctuaciones o grandes desviaciones del valor promedio son consecuencia de la naturaleza de la madera. Los factores de conversión de los tipos habituales de madera para rollos de madera con fines industriales o de producción energética de volumen a peso seco y viceversa deberán ser determinados para las especies de mayor interés y representa para nuestros países una oportunidad de tema de tesis o trabajo con los estudiantes. Por ejemplo en Europa se disponen de los factores de conversión para el grupo de especies más utilizadas con fines dendroenergéticos (Cuadro 4).

CUADRO 4: FACTORES DE CONVERSIÓN PARA LAS ESPECIES MÁS COMUNES DE MADERA PARA TROZAS INDUSTRIALES DE PESO SECO A VOLUMEN Y CONSIDERANDO LA CORTEZA (%).

Tipo de madera:	Corteza	kg/mcscs	mac/mcscs
	[%]	[kg]	[kg]
Picea	12	475	2,11
Abeto	12	475	2,11
Pino	13	570	1,75
Alerce	13	625	1,6
Haya	8	707	1,41
Roble / robinia	15	741	1,35
Arce	10	633	1,58
Fresno	14	755	1,32
Abedul	12	585	1,71

DEFINICIONES MÁS IMPORTANTES PARA EL ANÁLISIS DE LOS MATERIALES DENDROENERGÉTICOS

El contenido de agua (M): se mide con respecto a la totalidad de la masa fresca. Este valor expresa la cantidad de agua contenida en toda la biomasa húmeda (masa fresca), la cual está compuesta por biomasa seca (peso seco) y su contenido de agua correspondiente. En resumen, el contenido de agua puede describirse como la relación entre el agua y la materia total. El contenido de agua es la variable más importante para definir la calidad de las astillas de madera.

Humedad de la madera: La humedad de la madera (U) se mide con respecto al peso seco. Este valor expresa la relación entre masa de agua y masa seca. Por lo tanto, la humedad se puede convertir en contenido de agua y calcular a partir del mismo. En resumen, la humedad de la madera puede describirse como la relación entre el agua y la materia seca. La humedad de la madera es un término empleado habitualmente en el sector maderero. Sin embargo, para el aprovechamiento energético de la madera los cálculos solo se hacen utilizando el contenido de agua.

$$M = \frac{Gu - Go}{Gu} * 100 \quad U = \frac{Gu - Go}{Go} * 100$$

Donde:

M= es contenido de agua

U= es humedad de la madera

Gu= es el peso fresco

Go= es el peso seco

INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE AGUA EN EL PODER CALORÍFICO

Además del tipo y tamaño de la partícula de madera de que se trate, el contenido de agua también tiene una enorme importancia en lo que respecta a la utilización de la madera para producir energía a partir de biomasa. Dado que la biomasa sin contenido de agua no existe en la naturaleza, durante el proceso de combustión siempre se evaporará cierta cantidad de agua. La energía (calor) necesaria para este proceso disminuye el rendimiento energético neto. La influencia del contenido de agua en el poder calorífico de la biomasa utilizada puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$q_{p, net, ar} = q_{p, net, d} * \left(\frac{100 - M_{ar}}{100} \right) - 0.02443 * M_{ar}$$

Donde:

$q_{p, net, ar}$...	<i>Poder calorífico de la madera con un contenido concreto de agua [MJ/kg]</i>
$q_{p, net, d}$...	<i>Poder calorífico de la masa leñosa seca sin contenido de agua [MJ/kg]</i>
M_{ar}	...	<i>Contenido de agua a la entrega [%]</i>
$0,02443$...	<i>Constante de calor de vaporización del agua a 25 °C [MJ/kg]</i>

Siendo que el poder calorífico de la madera (de aprox. 18.5MJ/kg) disminuye a un ritmo lineal al aumentar el contenido de agua.

SELECCIÓN DE LOS TIPOS DE MADERA PARA GENERAR ENERGÍA

“Gama de madera para energía” es el término empleado para los tipos de madera utilizados en la generación energética. En principio es posible utilizar cualquier tipo de madera con fines energéticos. En la práctica existen muchas posibilidades de utilización mejores en el caso de la madera en rollo. Estos tipos de madera son denominados maderas para aserrar o maderas en rollo industriales. La madera para aserrar se procesa en aserraderos y la madera en rollo industrial en plantas de pasta y papel. Por este motivo, la madera para producir energía suele obtenerse de fuentes de baja calidad y clasificarse en función de su origen.

MATERIA PRIMA PARA PROCESAR

MADERA EN ROLLO PARA PRODUCIR ENERGÍA:

La madera en rollo para producir energía es un tipo de madera en bruto procedente del bosque o de las plantaciones. Hace referencia a la madera restante que no puede venderse como madera aserrada y que, por lo tanto, constituye productos derivados o secundarios del aprovechamiento de la madera en rollo. Entre ellos se encuentran, por ejemplo, trozas cortas, partes del tronco, madera de aclareos, polvo de serrado y madera de trituración, así como madera muy blanda (primeros aclareos a pequeña escala), aprovechamiento de árboles no comerciales, las podas y biomasa de manejo de cercas vivas y mantenimiento de las líneas de transmisión eléctrica (Figura7). También se incluyen los tipos de madera que no se pueden comercializar de otro modo (poda de la foresta urbana).



FIGURA 7: EJEMPLO DE GENERACIÓN DE BIOMASA EN LAS LABORES DE LIMPIEZA DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA.

MADERA PROCEDENTE DE CULTIVOS FORESTALES DE CORTA ROTACIÓN:

El cultivo de especies arbóreas de crecimiento rápido para el aprovechamiento de madera con fines energéticos es posible principalmente en terrenos que no constituyen áreas agrícolas y son tierras dedicadas a la producción forestal sin que represente la eliminación del bosque original. Las especies de árboles elegidas son aquellas con un ciclo de rotación muy corta (de 12 meses a 5 años). Para este tipo de cultivo se prefieren las especies con capacidad de rebrote y propiedades dendroenergéticas superiores (eucalipto, leucaena, melina, teca, madero negro, entre muchas otras). Al final de período de rotación, la madera se cosecha de forma total, en otros países se recurre a la cosecha automática o mecanizada. En el caso de la cosecha automatizada, los períodos de rotación se mantienen dentro del intervalo de alrededor de 3 a 5 años, ya que en este proceso se utiliza un sistema de cosecha que tala la madera aprovechable para producir energía en un solo paso y la transforma en astillas. En el caso de la cosecha mecanizada, se opta por ciclos de rotación de hasta 15 años. La madera para generar energía se apea utilizando una motosierra convencional y luego es recogida y apilada en un núcleo de producción forestal para secarla y dar inicio al proceso siguiente (Figura 8).



FIGURA 8: MADERA APILADA EN UN NÚCLEO DE PROCESAMIENTO FORESTAL DE UN PEQUEÑO PRODUCTOR.

RESTOS FORESTALES:

Cuando se llevan a cabo las operaciones de corta, además de madera aserrada, madera en rollo industrial y madera en rollo para producir energía, también se generan restos de corta. Las astillas de los restos forestales se producen a partir de los restos de la cosecha (ramaje, copas y madera caída) así como del corte en astillas del tronco y las ramas. Con los modernos sistemas de cosecha (como extracción con cable grúa o procesadoras), estos restos forestales se acumulan principalmente en las pistas forestales y pueden procesarse localmente.


La retirada de los restos forestales reporta varias ventajas a los propietarios forestales. La mayor protección de los bosques remanentes frente a las plagas al eliminar los espacios donde estas pueden proliferar, el uso de tipos de madera no comercializables; la limpieza de las zonas de corta eliminan el material combustible que alimenta los incendios forestales, además facilitan la reforestación y el cultivo de nuevos árboles. En principio, es posible utilizar la totalidad de la biomasa forestal para producir calor, por ejemplo en Chile se extraen hasta las raíces. Sin embargo, hacerlo es sumamente desaconsejable por motivos ecológicos, esto será un aspecto muy importante de monitorear.

MADERA DE PODAS Y ARBORICULTURA:

La madera de podas y arboricultura procede del cuidado y la poda de setos, árboles y arbustos. Se asocia a zonas no registradas como plantaciones forestales o de producción de madera para energía. Esta categoría incluye los tipos de madera que se producen de forma natural en jardines, parques, en los márgenes de los caminos y carreteras o en sistemas agroforestales.

RECORTES DE MADERA EN LA INDUSTRIA:

Los recortes son trozos de madera sobrantes del aserrado de los troncos. Estos productos secundarios del tratamiento de la madera se pueden utilizar sin procesar o transformados en astillas. Pueden emplearse con fines de generar calor o como material para otros usos (material de madera).



*El experimentador
que no sabe lo que
está buscando no
comprenderá lo que
encuentra.*

Claude Bernard (1813-1878)

PROTOSCOLOS RECOMENDABLES PARA EL ANÁLISIS DE LOS PRODUCTOS DE LA BIOMASA DENDROENERGÉTICA

MUESTREO, PREPARACIÓN DE LA MUESTRA, SUBMUESTREO

EN 14778:2011 BIOCMBUSTIBLES SÓLIDOS - MUESTREO

En este protocolo se definen los procesos de elaboración de planes y certificados de muestreo y los procesos de muestreo de biocombustibles sólidos, por ejemplo, en el lugar de origen de la materia prima, en una planta de producción o en los productos entregados, como en camiones o almacenes. Incluye procesos tanto manuales como automáticos aplicables a biocombustibles sólidos con cualidades bien definidas. Estos procesos pueden llevarse a cabo con materiales finos (con tamaños de partícula de hasta 10mm), materiales gruesos (con tamaños de partícula de hasta 200mm) y con balas y materiales gruesos con tamaños de partícula superiores a los 200mm, y sirven para realizar ensayos de muestreo que permitan determinar el contenido de agua, el contenido de cenizas, el poder calorífico, la densidad aparente, la distribución granulométrica, el punto de fusión de cenizas y la composición química. Al realizar muestreos debe prestarse una especial atención para garantizar que la muestra tomada sea representativa. Este estándar también incluye información sobre los aparatos de muestreo utilizados y sobre los procesos para calcular el número correcto de muestras.

EN 14780:2011 BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS - PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

En este protocolo se definen los procesos, aplicables a los biocombustibles sólidos, de reducción de las muestras totales (o individuales) a muestras de laboratorio y de las muestras de laboratorio a submuestras y muestras de análisis general. Los procesos definidos se pueden llevar a cabo durante la preparación de las muestras, por ejemplo, si es necesario realizar una inspección del contenido energético, de agua y de cenizas, la densidad aparente, la resistencia mecánica, la distribución granulométrica, el comportamiento de fusión de cenizas, la composición química y las impurezas. Estos procesos no están destinados a su uso con muestras muy grandes. Durante la reducción de muestras se debe velar por que cada submuestra siga siendo representativa de la muestra total.

FPREN ISO 18134-1:2013 BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS - DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA PARTE 1: CONTENIDO TOTAL DE AGUA - PROCEDIMIENTO DE REFERENCIA

En este estándar se define un proceso para determinar el contenido total de agua de una muestra de biocombustible sólido mediante el método de secado en horno, el cual es recomendable utilizar cuando se necesite obtener un resultado de contenido de agua absolutamente preciso. Es aplicable a todos los biocombustibles sólidos. En este proceso, la muestra de biocombustible (de 300g como mínimo) se seca con aire caliente a una temperatura de 105°C hasta que alcanza una masa constante, calculándose a continuación la proporción de agua como porcentaje con base en la pérdida de masa de la muestra. Se incluye también un proceso para corregir la velocidad.

FPREN ISO 18134-2:2013 BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS - DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA - PARTE 2: CONTENIDO TOTAL DE AGUA - PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO.

En este estándar se define un proceso para determinar el contenido total de agua de una muestra de biocombustible sólido mediante secado en horno, el cual se puede utilizar si no se necesita obtener un resultado totalmente preciso, por ejemplo, al realizar los controles de producción periódicos de las operaciones. El proceso definido es aplicable a todos los biocombustibles sólidos. Para determinar el contenido de agua mediante el procedimiento simplificado, la muestra de biocombustible se seca con aire caliente a una temperatura de 105°C hasta que alcanza una masa constante, calculándose a continuación la proporción de agua como porcentaje con base en la pérdida de masa de la muestra.

FPREN ISO 18134-3:2013 BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS - DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA - SECADO EN HORNO - PARTE 3: CONTENIDO DE AGUA EN MUESTRAS DE ANÁLISIS GENERAL.

En este estándar se define un proceso para determinar el contenido de agua de una muestra de análisis mediante el secado de la misma en un horno. El proceso definido es aplicable a todos los biocombustibles sólidos. En este proceso, la muestra de análisis de biocombustible se seca a una temperatura de 105°C, calculándose a continuación el contenido de agua con base en la pérdida de masa de la muestra. Pueden utilizarse aparatos automáticos si el proceso se valida con muestras de referencia de biomasa de un tipo de biomasa adecuado. Estos deben cumplir todos los requisitos del estándar en lo que se refiere a tamaño de la muestra, temperatura, atmósfera y precisión de pesaje.



PROPIEDADES DE LA BIOMASA FORESTAL CON FINES BIOENERGÉTICOS

PRINCIPALES PROPIEDADES A CONSIDERAR EN TODO ANÁLISIS DE BIOMASA SEGÚN LAS ESPECIES

Las principales propiedades de los materiales dendroenergéticos se resumen en el Cuadro 5.

CUADRO 5: PRINCIPALES PROPIEDADES DE RESIDUOS FORESTALES COMO BIOCOMBUSTIBLES DIN 51731.

PROPIEDAD DE LA BIOMASA	UNIDAD S.I.	REQUERIMIENTO
Densidad	Kg/m ³	1-1.4
Humedad	%	≤12
Cenizas	J*g ⁻¹	≤1.5
Poder calorífico	%	≥18000
S	%	≤0.08
N	%	≤0.3
Cl	%	≤0.03

El poder calorífico, es definido como el calor desprendido por kilogramo de combustible en combustión completa a la presión constante de 1kg/cm² y temperatura atmosférica normal. Esta es la característica fundamental que define a un combustible como tal. Altos poderes caloríficos indican buenos combustibles y bajos poderes caloríficos señalan combustibles más discretos. Esta propiedad depende de la composición química y del contenido de humedad que posea el material al momento de ser quemado, así el poder calorífico aumenta a medida que disminuye el contenido de humedad. Por consiguiente a manera de ejemplo, el aserrín es utilizado limitadamente como combustible en forma directa, debiendo ser presecado para proporcionar mayor rendimiento calórico.

En países como España, la obtención de poderes caloríficos se realiza a combustiones completas y a volumen constante, no a presión constante. Lo anterior, dado que la presión del oxígeno en la bomba calorimétrica no es de 1kg/cm^2 sino generalmente de 20 a 30kg/cm^2 . Algunos autores han distinguido los conceptos de poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI). El poder calorífico superior llamado también calor de combustión superior, es el valor desprendido por un kilogramo de biomasa forestal, y su valor se mide en bomba calorimétrica. La combustión se realiza a volumen constante. El poder calorífico inferior (PCI) es el calor desprendido por un kilogramo de combustible, en una combustión en la que el agua del combustible se libera en forma de vapor. Si esta agua se condensa desprendería calor y se obtendría PCS. Por tanto el PCI es menor que el PCS. La bomba calorimétrica se usa para determinar el poder calorífico de un combustible cuando se quema a volumen constante. Debido a que los gases producidos durante la combustión al final se encuentran a temperaturas bastante bajas y a alta presión, la mayor parte del agua presente en los productos se condensa, por lo cual el poder calorífico que se determina con el uso de la bomba calorimétrica es el superior. De los métodos de determinación del poder calorífico superior se considera que el de mayor exactitud es el de la bomba calorimétrica (Brown *et al.*, 1952; Martín, 1989). En el Cuadro 6 se presentan valores caloríficos superiores de biocombustibles más comunes.

El potencial calórico a su vez, se ve afectado por diversos factores entre los cuales se puede mencionar la humedad, proporción de cenizas y la composición química. Kollmann, (1959) consideró para la madera anhidra y sin cenizas un poder calorífico promedio de $18,810\text{Jg}^{-1}$ para maderas latifoliadas de climas templados mientras que Brown *et al* (1952) reportó para las mismas maderas un valor promedio de $19,646\text{J/g}$. Doat (1977) en un estudio efectuado a 111 especies de maderas tropicales encontró un poder calorífico promedio de $19,938\text{Jg}^{-1}$. La cantidad de agua existente en el biocombustible afecta de forma decisiva a la energía disponible de cada biocombustible. Habitualmente, se utilizan dos métodos, referido al producto en seco y referido al producto en húmedo para establecer el contenido de humedad, según el procedimiento utilizado para contabilizar la masa de agua. Es importante distinguirlos, especialmente cuando el contenido de humedad es elevado. En el caso del proceso de peletizado, se suelen utilizar partículas secas con una humedad menor del 12% base húmeda.

CUADRO 6: VALORES DE PODER CALORÍFICO PARA LOS PRINCIPALES TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLES.

BIOCOMBUSTIBLE	PODER CALORÍFICO SUPERIOR (J G^{-1})
Leñas y astillas	18,810-22,154
Pellets y briquetas de madera	18,810-22,154
Carbón vegetal	30,090-32,604
Bioetanol	40,546-43,890
Bioaceite	40,546-43,890

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MADERA Y CORTEZA

La madera es un biopolímero tridimensional cuya composición química general está formada por compuestos esenciales o primarios: holocelulosa (celulosa y hemicelulosa) y lignina y compuestos extraños o secundarios: extractos (en agua, en solventes, volatilizados en vapor) y no extraíbles (compuestos inorgánicos, proteínas y sustancias pépticas). La celulosa está formada por celobiosa, es blanca, inodora e insípida y es la materia prima principal para la fabricación de pastas de disolución y paneles para construcción.

Las hemicelulosas son carbohidratos no celulósicos de bajo peso molecular que ayudan en los procesos de refinación de fibras debido a que son moléculas más reactivas y se hidratan más fácilmente (Gutiérrez *et al.* 1998). La lignina es un polímero natural cuyas unidades estructurales se derivan del fenilpropano; es subproducto de los pulpeos químicos de la madera y se utiliza a nivel industrial en la producción de poliuretano. Los extractos son compuestos solubles en diferentes solventes, como ejemplo, en alcohol benceno se solubilizan ceras, grasas y resinas; en agua fría, taninos, gomas, azúcares, materiales colorantes y en agua caliente los almidones. Pueden clasificarse en ácidos volátiles, aceites esenciales, ácidos resinosos y polifenoles. Entre los contenidos inorgánicos de la madera se encuentran los cristales y el sílice. Los cristales son depósitos en su gran mayoría de sales de calcio, que se encuentran principalmente en células parenquimáticas. El sílice es un material cuya fórmula química y grado de dureza se asemejan al diamante, pueden encontrarse en el interior de las células en forma partículas o granos. Los cristales y depósitos de sílice tienen gran importancia en la propiedad de trabajabilidad de la madera y se conocen popularmente como cenizas, se ha informado que tanto para coníferas como para latifoliadas varían entre 0.1 y 1.0%.

La composición química de la corteza es compleja, al igual que la madera, contiene polisacáridos (celulosa y hemicelulosa) y lignina, pero a diferencia de ella tiene una mayor concentración de extraíbles. Estos extraíbles comprenden una amplia variedad de compuestos orgánicos dispersos y depositados en el lumen celular o impregnando las paredes de las células, que pueden removerse con solventes neutros de polaridad variable como hexano, éter, acetato de etilo, acetona, etanol, metanol y agua, entre otros. De la fracción lipofílica (no polar) se extraen grasas, ceras, terpenos y alcoholes alifáticos superiores, mientras que la fracción hidrofílica (polar) está constituida principalmente por sustancias polifenólicas.

La composición química posee una fuerte influencia en el poder calorífico, sobre todo la presencia de lignina y los extractivos totales como resinas, taninos, grasas y aceites. Es importante conocer la composición química elemental del material ya que esta condiciona su poder calorífico, los gases emitidos en la combustión y la composición de las cenizas. Lo ideal es conocer los porcentajes de la madera y corteza, así como la humedad a la que se manipulan estos productos. Doat (1977), encontró para la lignina aislada en ácido sulfúrico un poder calorífico de 25,498Jg⁻¹ en maderas resinosas.

En general, la madera en base a su peso, está compuesta de 20-40% de lignina, 30-50% de celulosa, 9-28% de pentosanas y 0.2-20% de extractivos, presentándose diferencias cuantitativas entre coníferas y latifoliadas. Diversos estudios reportan información general sobre propiedades químicas de la madera y algunas posibles aplicaciones de su transformación química. Rutiaga (2001), en un análisis químico en albura y duramen de *P. pseudostrobus*, encontró un contenido de extraíbles totales de 13.2% en duramen y 4.4% en albura; polisacáridos 67.2% en duramen, 67% en albura; lignina 27.6% en duramen y 26% en albura; cenizas 0.08 % en duramen y 0.16% en albura.

Las maderas ricas en extractivos y lignina tienen mayor poder calorífico. Los compuestos extraíbles cubren una amplia variedad de compuestos de bajo peso molecular que pueden ser aislados de los materiales lignocelulósicos mediante extracciones con solventes orgánicos polares y no polares. La cantidad y la composición de los compuestos extraíbles varían según la especie considerada, la parte de la planta, época del año. Sin embargo, se ha encontrado que la concentración de celulosa, lignina, sustancias extraíbles, taninos, cenizas y contenido de humedad en *Pinus maximinoi* no varía significativamente en función de la altura en que se

extrae la muestra. Lo que indica que en cualquier parte del árbol se pueden encontrar en una cantidad similar.

El poder calorífico superior de la madera, además de la humedad, está muy influenciado por la constitución química de la madera, principalmente la lignina y extraíbles. De esta manera, las coníferas que presentan un contenido de resinas y lignina mayor que las latifoliadas ostentan por consiguiente un mayor poder calorífico superior, que varía también según la parte del árbol que esté en combustión. El poder calorífico es más alto cuando mayor es la cantidad de lignina y extraíbles, porque contienen menos oxígeno que los polisacáridos presentes en la holocelulosa (celulosa y hemicelulosa).

La densidad de la madera, es decir, el peso por unidad de volumen, varía ampliamente entre diferentes especies y tipos de madera. La densidad básica es uno de los parámetros para evaluar la calidad de la madera, que está directamente relacionada con las propiedades físicas, mecánicas y anatómicas, pudiendo así, caracterizar el uso final de la madera. Es importante observar la influencia del contenido de humedad en la densidad de la madera. Cuanto mayor sea el agua por unidad de peso menor será la cantidad de leña. Por ello, es imperativo precisar con exactitud del contenido de humedad al establecer el peso de la madera. Para un porcentaje de humedad igual, un volumen dado de madera densa tiene un poder calorífico más elevado que una madera más liviana. Por el contrario, si no se considera las sustancias extraíbles que puedan estar presentes, un peso dado de madera a determinado contenido de humedad, dará más o menos la misma cantidad de calor en una madera densa o liviana. La diferencia es que las maderas duras se queman más lentamente (Doat, 1977).

Según Cunha *et al.* (1989), no hay correlación entre densidad básica y el poder calorífico. Sin embargo, en relación al volumen de madera que se quema la densidad se relaciona positivamente con el contenido calórico de la madera, estimulando el interés de maderas pesadas para la quema. El objetivo principal de los procesos de transformación de la materia prima a biocombustibles es obtener un producto final de mayor densidad que el producto inicial. Al tener mayor densidad el producto se transportara ocupando menos volumen (a igualdad de peso) y por lo tanto será más sencilla su manipulación.

Otro factor importante del contenido de energía del biocombustible es el contenido de cenizas, que se mide siempre con referencia al producto en seco y se refiere al residuo sólido que persiste tras una combustión total. Si bien el contenido de ceniza de la leña es generalmente del 1%, algunos combustibles de origen agrícola pueden tener un contenido de ceniza muy elevado. Esto influye en el valor energético de los biocombustibles, dado que las sustancias que forman las cenizas no tienen, por lo general, valor energético (FAO, 1997).

La importancia de evaluar la concentración de las propiedades físicas y composición química de la madera y corteza de diferentes especies forestales contribuye en el conocimiento de cuáles pueden ser las fuentes más importantes de esos compuestos. El conocimiento de los patrones de variación dentro de especies hace posible lograr el mayor y mejor aprovechamiento de estos recursos.



DESCRIPCIÓN DE RUTINAS DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DEL MATERIAL DENDROENERGÉTICO

PROPIEDADES FÍSICAS

Para cada una de las especies que se van a estudiar es necesario determinar el contenido de humedad (%) y densidad básica (g/cm^3) en albura y duramen cuando se presente esta diferenciación (Figura 9). Las probetas se dimensionaron a $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}$ en sus direcciones radial, tangencial y longitudinal con una sierra circular. Se pesan inmediatamente después del corte para obtener el peso verde. El peso anhidro de las probetas se obtiene después de secarlas en una estufa a $103^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ hasta peso constante de acuerdo a lo establecido con la norma DIN 52183. El cálculo de la densidad básica se realiza relacionando los valores del peso anhidro y el volumen verde de las probetas de acuerdo con lo establecido en la norma DIN 52182.

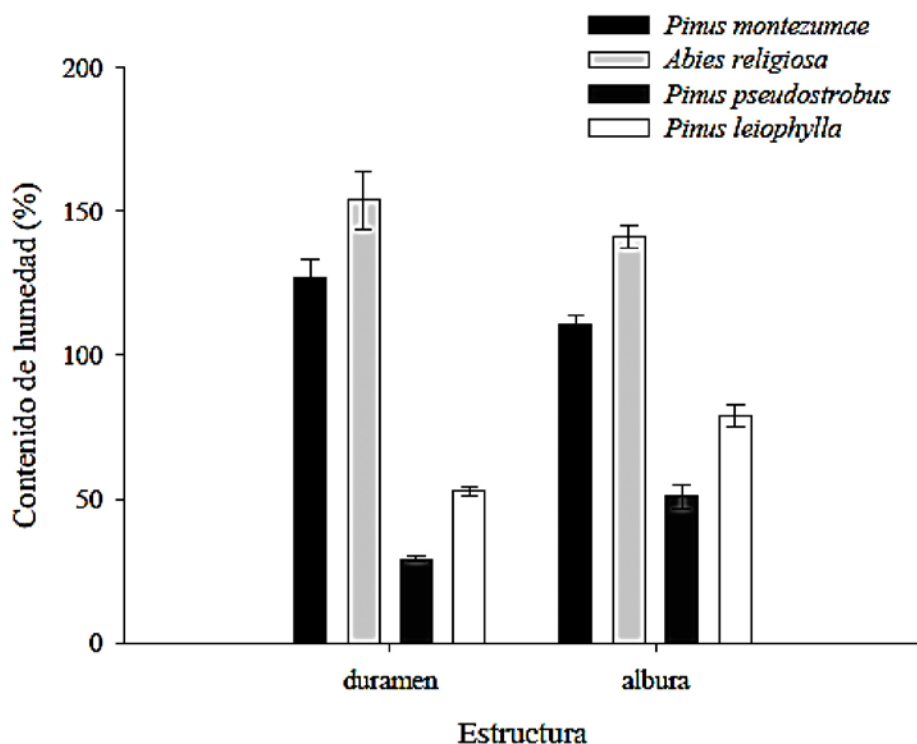


FIGURA 9: EJEMPLO DE RESULTADOS DE LA VARIACIÓN EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD ENTRE ALBURA Y DURAMEN PARA 4 ESPECIES FORESTALES.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

COMPOSICIÓN ELEMENTAL DE LA BIOMASA

Los distintos elementos que componen la biomasa tienen una influencia determinada en las características energéticas de ésta. Algunos elementos influyen en la combustión, otros en la corrosión y en el ambiente, y otros en las características de las cenizas residuales. Por esto es importante conocer cuáles son los elementos de mayor abundancia en este tipo de materia.

ELEMENTOS DE MAYOR ABUNDANCIA:

El Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Azufre (S) son los seis elementos de mayor abundancia en la biomasa, también llamados macronutrientes por su abundancia relativa. Constituyen el 96% de la biomasa en base seca y forman parte de las moléculas más abundantes.

De estos elementos el carbono y el oxígeno son los elementos más abundantes con proporciones análogas, del 43% al 48% del peso seco.

El hidrógeno está presente entre el 5.5% al 6.5%.

El nitrógeno está presente entre el 1.5% y el 5%, según el contenido proteico de la biomasa.

El Calcio (Ca), Sodio (Na), Potasio (K), Cloro (Cl), Yodo (I) y Magnesio (Mg) y Hierro (Fe) son siete elementos que también son esenciales, pero tienen abundancia menor. En conjunto constituyen cerca de un 3.9% de la biomasa en base seca. Forman parte de sales o de moléculas específicas como el caso del magnesio en la clorofila o el hierro en la hemoglobina.

El Cobre (Cu), zinc (Zn), Manganeseo (Mn), Cobalto (Co), Molibdeno (Mo), Níquel (Ni), Selenio (Se) y Silicio (Si), son los ocho elementos restantes entre los más esenciales de la biomasa. Se les llama también elementos traza y constituyen un 0.1% de la biomasa.

También hay otra serie de elementos, como Al, As, Ba, Cd, Cr, Hg, Pb, Sb, Ti, TL, V y W, están presentes en la biomasa en menor medida y aparecen en las cenizas, con mayor o menor proporción, pero su efecto sobre las actividades vitales, si es que lo tienen, se desconoce. Su uso práctico es como fertilizante.

ELEMENTOS QUE TIENEN EFECTOS SOBRE LA COMBUSTIÓN

El carbono y el hidrógeno desprenden energía al oxidarse completamente. Además, el oxígeno favorece la combustión completa, por lo que disminuye la cantidad de aire necesaria en el proceso de producir energía.

ELEMENTOS CON INFLUENCIA SOBRE LA CORROSIÓN Y/O EL MEDIO AMBIENTE

El cloro puede dar lugar a dioxinas y cloro libre, que son nocivos para el medio ambiente. También se puede dar la formación de cloruro de hidrógeno, que junto al vapor de agua puede causar la corrosión de materiales de hierro.

El nitrógeno contenido en la biomasa, al oxidarse en la combustión, puede originar óxidos de nitrógeno, que sumados a los que se producen normalmente a altas temperaturas con el nitrógeno atmosférico, puede aumentar considerablemente la presencia de estos gases en las emisiones, resultando en efectos nocivos para la salud. Por esto, en principio se debe evitar quemar biomasa con alto contenido en nitrógeno.

El azufre al oxidarse en la combustión produce óxidos de azufre, que con el vapor de agua se transforma en ácido sulfúrico. Este ácido puede causar corrosiones en materiales de hierro y al propagarse con las emisiones al aire es uno de los causantes de las lluvias ácidas.

ELEMENTOS MAYORITARIOS EN LAS CENIZAS DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASAS

Entre los elementos que más presentes en forma de óxido en las cenizas de la combustión de la biomasa están aluminio, calcio, cloro, hierro, potasio, magnesio, sodio, fósforo, selenio, silicio y titanio.

El sodio y el potasio pueden influir en la vitrificación de las cenizas, en relación a su abundancia y a la temperatura de combustión.

El calcio y magnesio pueden neutralizar el efecto del sodio y el potasio en la vitrificación de las cenizas.

El contenido de potasio, fósforo, magnesio e hierro en las cenizas puede determinar su uso como fertilizante. (San Miguel y Gutiérrez, 2015).

ELEMENTOS MINORITARIOS EN LAS CENIZAS DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASAS

Algunos elementos que se encuentran en menores proporciones en las cenizas de la combustión de biomásas pueden tener aplicación como micronutrientes en su aplicación como fertilizantes. Varios de estos microelementos, tales como cadmio, bario, mercurio o zinc –dependiendo de la concentración que alcancen– pueden hacer que la ceniza no se deba utilizar como fertilizante por ser nocivos para la salud humana.

EL ANÁLISIS QUÍMICO

Los análisis químicos se realizan a partir de muestras de 10cm de espesor de las cuales se separa la corteza, albura y duramen, se astillan con formón y martillo. Las astillas se secan a ambiente y se trituran en un molino, de acuerdo con la norma T 2570m-85 (TAPPI, 2000), se tamiza con tamices Mont inox. Los análisis químicos se utilizan únicamente con la harina que pasa por la malla 40 (abertura de 420 μ m de diámetro) recolectándose la fracción que pasó por ella. La harina es almacenada en envases *pet* debidamente cerrados para evitar cualquier tipo de contaminación y absorción de humedad. Cada una de las determinaciones se realiza por triplicado (Figura 10).

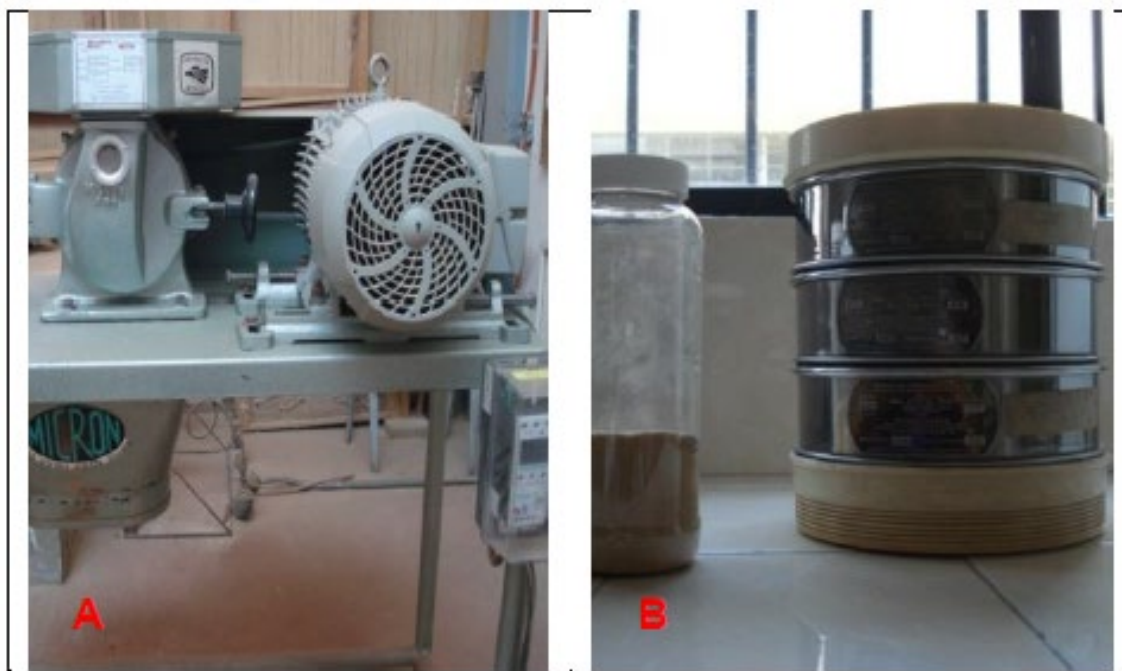


FIGURA 10: MOLINO (A) Y TAMICES UTILIZADOS PARA OBTENER LA HARINA A TAMAÑO DE PARTÍCULA MALLA 40 (B).

Antes de iniciar la caracterización química se determina la humedad de las harinas (%), según el método de deshidratación a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ y con apego a la norma T 264cm-97 (TAPPI, 2000). La humedad de las harinas sirve para presentar los resultados de los análisis químicos con base a su peso seco. El material empleado para determinar la humedad no se utiliza para realizar los análisis químicos.

pH Y SOLUBILIDAD A LA SOSA

La determinación de pH se realiza utilizando un potenciómetro por inmersión del electrodo en las muestras de harina en agua destilada según la metodología de Sandermann y Rothkamm (1959). La determinación de contenido de sustancias solubles a la sosa (%) se realiza con apego a la norma T 212om-98 (TAPPI 2000), adicionando NaOH al 1% y ácido acético al 10% (Figura 11). La Figura 12 muestra los resultados de valores de pH para la corteza, la albura y duramen en 4 especies forestales.



FIGURA 11: OBTENCIÓN DE PESO PARA DETERMINAR LA HUMEDAD (A), POTENCIÓMETRO PARA OBTENER VALOR DE PH (B), PROCESO PARA DETERMINAR SOLUBILIDAD A LA SOSA (C).

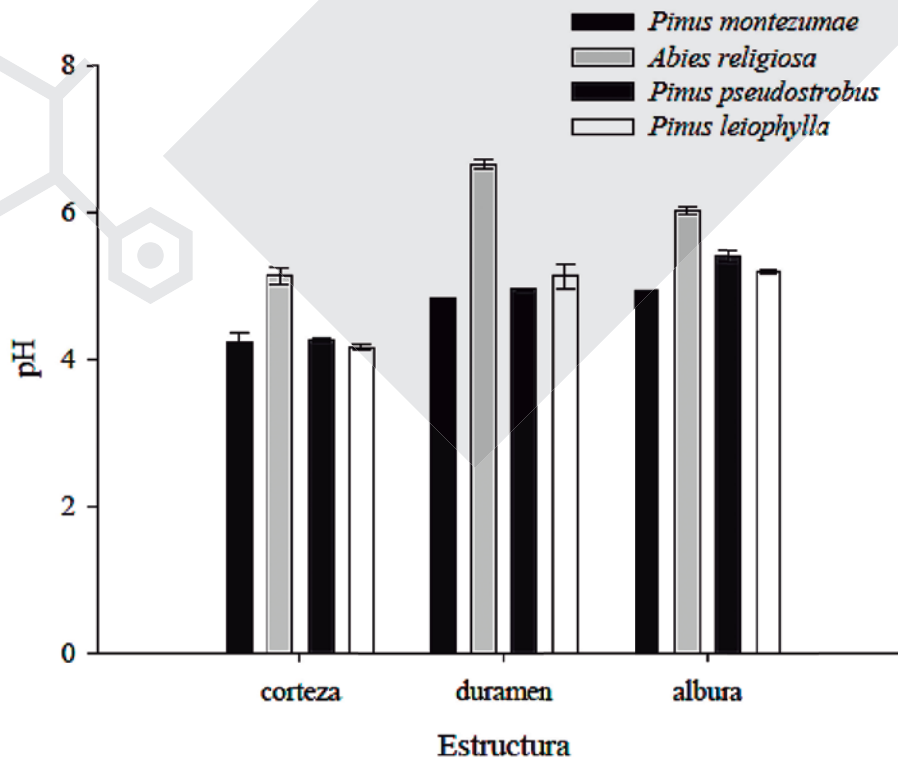


FIGURA 12: PH EN CORTEZA, DURAMEN Y ALBURA POR ESPECIE. CADA BARRA REPRESENTA EL VALOR PROMEDIO DE LAS OBSERVACIONES \pm 1 ERROR ESTÁNDAR.

CONTENIDO DE CENIZAS Y MICROANÁLISIS DE CENIZAS

La determinación del contenido de cenizas (%) se lleva a cabo por método gravimétrico el cual consiste en quemar la muestra de madera dentro de crisoles de níquel en placas de calentamiento y posteriormente en una mufla a $525 \pm 25^\circ\text{C}$ durante un periodo de 4 horas, de acuerdo con la norma UNE-EN 14775 (2010). El microanálisis de las cenizas obtenidas se realiza mediante energía dispersiva de rayos-x, acoplado a un microscopio electrónico de barrido marca (Ivaska y Harju, 1999) (Figura 13). La Figura 14 muestra el comportamiento del contenido de cenizas en 4 especies forestales según el tipo de tejido de donde proviene.



FIGURA 13: HARINA DE MADERA EN CRISOLAS DE NÍQUEL SOBRE PLACA DE CALENTAMIENTO (A), CRISOLAS DENTRO DE MUFLA PARA OBTENCIÓN DE CENIZAS (B) Y MICROSCOPIO DE BARRIDO PARA MICROANÁLISIS DE CENIZAS (C).

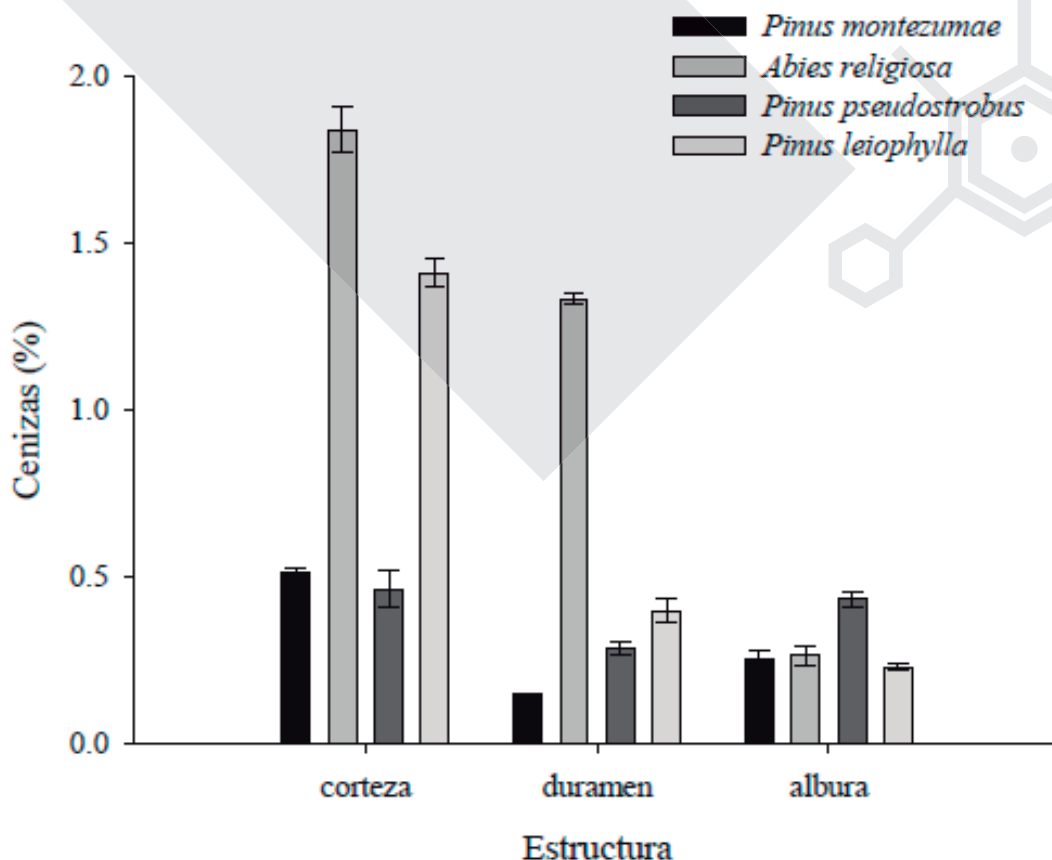


FIGURA 14: CONTENIDO DE CENIZAS EN CORTEZA, DURAMEN Y ALBURA POR ESPECIE. CADA BARRA REPRESENTA EL VALOR PROMEDIO DE LAS OBSERVACIONES \pm 1 ERROR ESTÁNDAR.

EXTRACTOS, LIGNINA, HOLOCELULOSA Y ALFA-CELULOSA

La obtención de extractos (%) a partir de harina de corteza, albura y duramen, se prepara en un tamiz malla 40, luego se realiza el pesado de la harina en un dedal de extracción y se coloca en un extractor con solventes de polaridad creciente: ciclohexano, acetona, metanol y agua caliente bajo reflujo durante un tiempo de extracción de 6 horas en todos los casos. Los solventes son destilados a vacío en un rotavapor y los extractos acuosos se pesan (Holmbom, 1999). La harina libre de extractos queda lista para el análisis de holocelulosa y lignina (Figura 15).

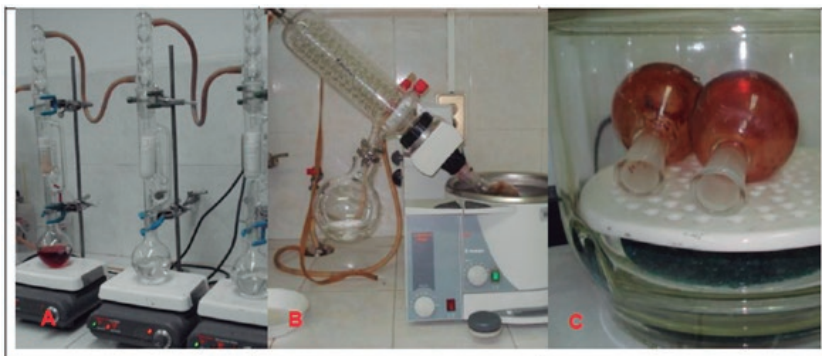


FIGURA 15: EXTRACCIÓN DE CORTEZA, DURAMEN Y ALBURA EN EQUIPO SOXHLET (A), DESTILACIÓN DE SOLVENTES EN ROTAVAPOR (B) Y EXTRACTOS EN MATRICES DENTRO DEL DESECADOR PARA OBTENCIÓN DE EXTRACTOS (C).

Para determinar el contenido de lignina (%) se utiliza la técnica Runkel y Wilke (1951), la cual consiste en agregar a la muestra ácido sulfúrico al 72% y ácido bromhídrico al 40%. La determinación de holocelulosa (%) se lleva a cabo de acuerdo con el método Wise 1946, in: Sanjuán (1991), añadiendo a la harina libre de extractos clorito de sodio y ácido acético. El contenido de alfa-celulosa (%) se obtiene siguiendo la norma ASTM D 1103-60 (1977), tratando la harina base seca de holocelulosa con hidróxido de sodio (17.5%) y luego con ácido acético al 10%. (Ver figura 16). En la Figura 17 se muestra el ejemplo de los contenidos de lignina en diferentes tejidos de la madera para 4 especies forestales.



FIGURA 16: LIGNINA EN PAPEL FILTRO (A), PROCESO DE OBTENCIÓN DE HOLOCELULOSA (B) Y FILTRADO AL VACÍO DE ALFA-CELULOSA (C).

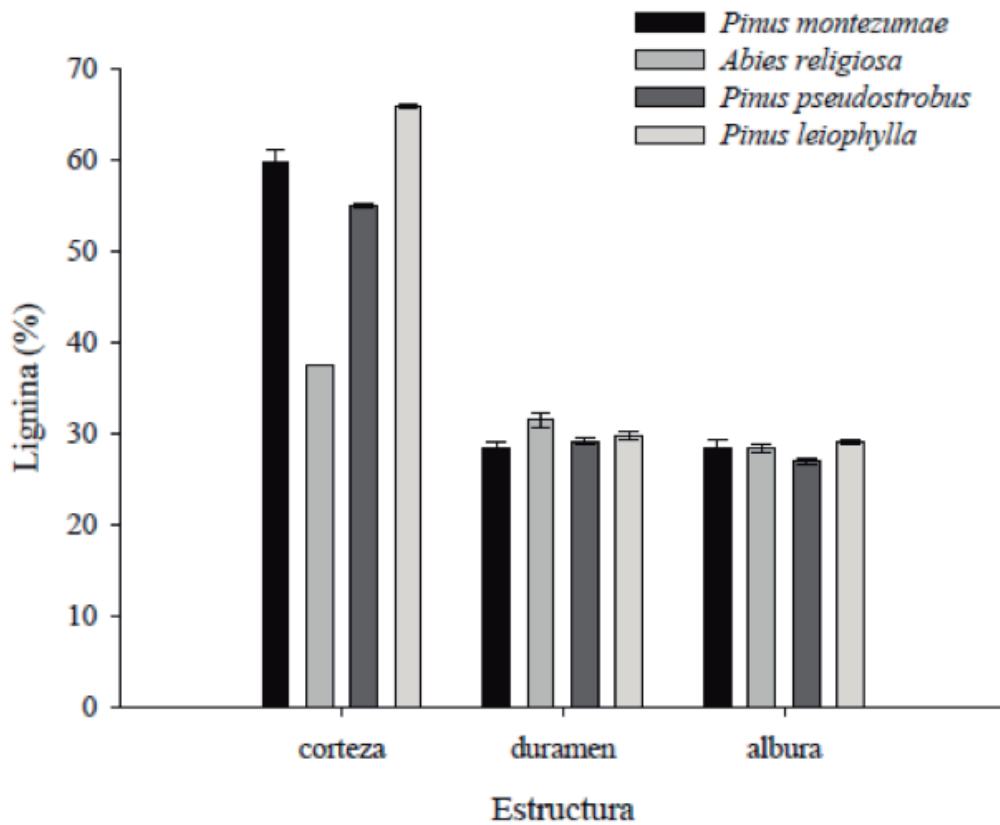
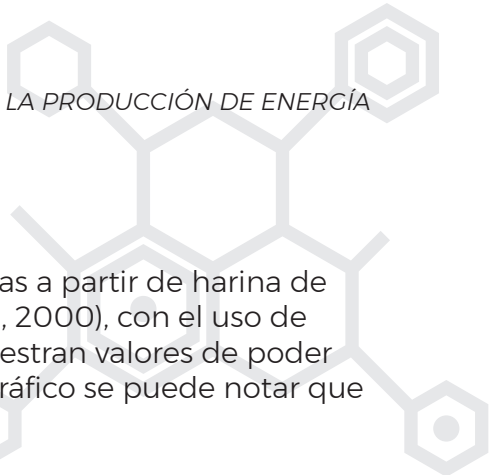


FIGURA 17: CONTENIDOS DE LIGNINA EN DIFERENTES TEJIDOS DE LA MADERA PARA 4 ESPECIES FORESTALES.



PODER CALORÍFICO

El poder calorífico superior (Jg^{-1}) se determina en pastillas compactadas a partir de harina de corteza, duramen y albura, con base la técnica T Parr 1341 ns-78 (TAPPI, 2000), con el uso de una bomba calorimétrica de oxígeno (Figura 18). En la Figura 19 se muestran valores de poder calorífico para 4 especies y diferentes tejidos de la madera, en dicho gráfico se puede notar que no existen grandes diferencias entre los distintos tejidos analizados.

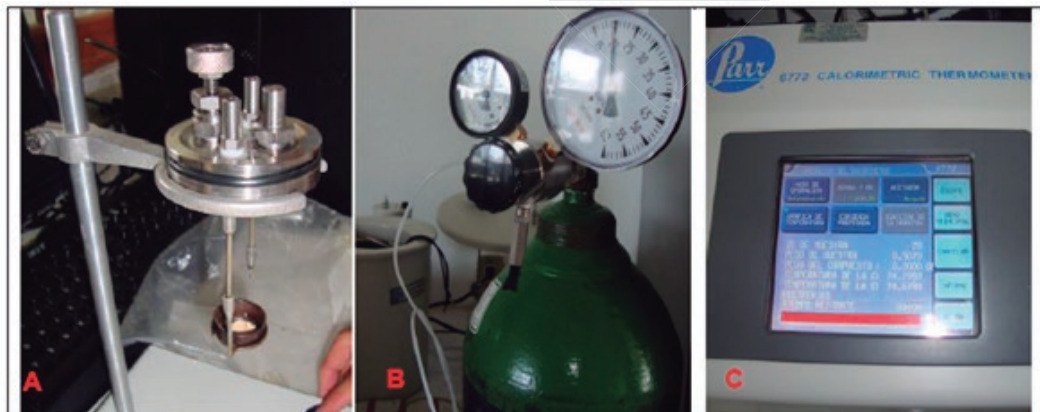


FIGURA 18:
PASTILLA EN LA
BOMBA DE OXÍGENO
(A), TANQUE DE
OXÍGENO (B) Y
CALORÍMETRO
TERMÓMETRO
DIGITAL (C).

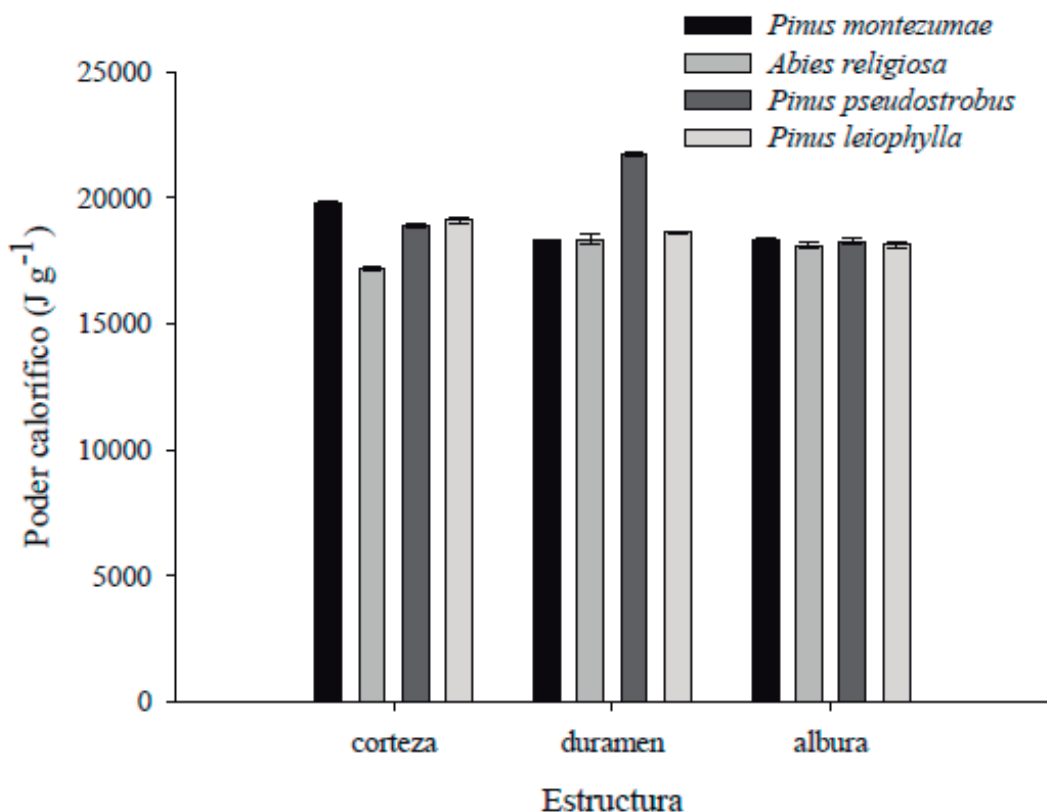



FIGURA 19: VALORES DE PODER CALORÍFICO PARA 4 ESPECIES Y DIFERENTES TEJIDOS DE LA MADERA.



*Los ordenadores
te enseñan algo
importante, y es
que no tiene sentido
recordarlo todo.*

*Lo importante es ser
capaz de encontrar
cosas.*

Douglas Coupland (1961 - ?)



ESTUDIOS DEL EFECTO DE DIFERENTES FACTORES (ESPACIAMIENTOS, ESPECIES, EDADES Y SITIOS).

PRUEBAS DE LABORATORIO APLICABLE A LA BIOMASA SEGÚN NORMAS ESTANDARIZADAS

En esta sección se propone el abordaje metodológico básico para el estudio de los efectos de las plantaciones dendroenergéticas en las propiedades tecnológicas y especialmente la transformación de la biomasa en energía mediante el proceso de gasificación. El objetivo es que el estudiante comprenda la metodología a seguir bajo un diseño experimental y utilizando los protocolos de análisis y validación de los datos.

ESTADO DE SITUACIÓN

La demanda de energía a nivel mundial crece rápidamente. Los altos precios de los combustibles fósiles combinados con el incremento de los problemas ambientales, intensificados por el cambio climático, han obligado a crear políticas a nivel mundial para apoyar fuentes alternativas de energía renovable, las cuales contribuyen a cerca del 19% del consumo de la energía total del planeta, cuya mitad es suplida por la biomasa (Kullander, 2009; Hauk *et al.*, 2014).

La biomasa es una de las fuentes energéticas más prometedoras ya que es una alternativa a las fuentes convencionales de energía tales como petróleo y el gas natural. Entre las ventajas que tiene el uso de la biomasa está principalmente que es un producto limpio y renovable, lo cual contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la dependencia de los combustibles fósiles (Luque *et al.* 2008). En este sentido la búsqueda de biomasa provenientes de los cultivos agrícolas o de residuos forestales ha tomado un importante desarrollo en los últimos años (Gokcol *et al.* 2009).

Sin embargo, para manipular esta biomasa se requiere de un gran consumo energético, lo que se traduce en un limitante para su utilización (Stelte *et al.* 2011). Su alto contenido de humedad, sus formas y tamaños irregulares, y su baja densidad aparente, hacen de la biomasa un material difícil de transportar, almacenar y utilizar en su forma original (Kaliyan and Morey 2009). Estos factores hacen que el uso de la biomasa para la producción de energía sea ineficiente, por lo que es necesario mejorar su eficiencia energética por medio de procesos como la gasificación.

La gasificación es un proceso de oxidación parcial termo químico en el que la biomasa es convertida en gas en presencia de un agente gasificante (aire, vapor, oxígeno, CO₂ o una mezcla de éstos). El gas generado, comúnmente conocido como syngas (gas de síntesis), se compone principalmente de H₂, CO, CO₂, N₂, pequeñas partículas de carbón, cenizas y aceites (Ruiz *et al.* 2013). La gasificación ha demostrado ser una opción exitosa para la gestión de residuos, la producción química y la producción de energía a partir de residuos (Kumar and Sheth 2015).

La gasificación se plantea como una tecnología viable para dar tratamiento a los residuos orgánicos procedentes del sector industrial y agrícola con el fin de generar energía renovable. Sin embargo, no todos los tipos de biomasa pueden ser utilizados en el proceso de gasificación (Plis and Wilk 2011). Por ejemplo, algunos biocombustibles como la cascarilla de la avena presenta resultados insatisfactorios durante el proceso de gasificación, produciendo syngas con un poder calórico muy bajo (Plis and Wilk, 2011). Es necesario evaluar características específicas de la biomasa como el porcentaje de humedad, densidad real y aparente, poder calórico y porcentaje y tipo de cenizas (Ruiz *et al.* 2013).

En la actualidad existe la necesidad de investigaciones más detalladas sobre la caracterización de la biomasa que puede ser utilizada con fines energéticos. El comportamiento o rendimiento del proceso de gasificación va a depender entre varias cosas de factores como la temperatura, el agente gasificante y el contenido de humedad y el tamaño de partícula de la biomasa (Vassilev *et al.* 2012). Algunos estudios señalan el tamaño de partícula como un factor determinante dentro del proceso de gasificado, al respecto Zou *et al.* (2012) determinaron que a nivel experimental tamaños de partícula menores a 2mm no poseen influencia en la composición del gas producido.

Pérez *et al.* (2012) desarrollaron un experimento con un reactor downdraft y determinaron que la biomasa se comporta de forma diferente de acuerdo con su tamaño, ellos observaron que el aumentar el tamaño de la partícula se traduce en un menor radio de consumo de la biomasa y lo tanto en una menor eficiencia del proceso, y concluyeron que tamaños de partículas en el rango de 2 a 6mm son los óptimos.

En Costa Rica al igual que Honduras, la utilización de la biomasa en procesos de gasificación es un tema que se está empezando a desarrollar, en la actualidad solo existen muy pocos

gasificadores de biomasa en la región centroamericana. En Costa se cuenta con dos gasificadores, uno se encuentra en operación utilizando biomasa proveniente de astillas de *Cupressus lusitanica* (Ciprés) y broza de café y el otro utiliza astillas de *Gmelina arborea*. Sin embargo, no existe información científica sobre las características de esta biomasa o del proceso en sí.

La biomasa proveniente de madera, presenta grandes ventajas sobre otras fuentes de energía renovable como por ejemplo mejores propiedades energéticas y una menor emisión de CO₂ en comparación con la biomasa proveniente de pastos o algunos cultivos agrícolas (Tenorio *et al.*, 2015). Sin embargo, el aumento en la demanda de la biomasa maderable ha conducido a la explotación de los recursos forestales naturales (FAO, 2012), y en este sentido, el establecimiento de plantaciones energéticas para la producción de biomasa maderable ha aumentado a nivel mundial (Evans *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2014).

En el establecimiento de las plantaciones maderables energéticas de corta rotación en climas templados se destacan los géneros *Populus*, *Salix*, *Eucalyptus*, *Pinus* y sus respectivos híbridos (DeBell *et al.*, 1996; Dickmann, 2006; Hinchee *et al.*, 2009). Sin embargo, el desarrollo de cultivos de corta rotación para la producción de biomasa maderable es muy limitado en las regiones tropicales, a excepción de Brasil, que presenta los primeros cultivos de este tipo utilizados en plantaciones energéticas (Le Maire *et al.*, 2014; Betters *et al.*, 1991). En Costa Rica, recientemente se han establecido plantaciones energéticas de corta rotación (Navarro-Camacho *et al.*, 2014, Tenorio *et al.* 2016). Dentro de las especies utilizadas *Gmelina arborea* ha ganado popularidad. No obstante hasta el día de hoy es limitada la información de la especie en cultivos energéticos de corta rotación, a pesar de que existe información sobre su potencial energético (Moya y Tenorio 2013; Tenorio *et al.* 2015).

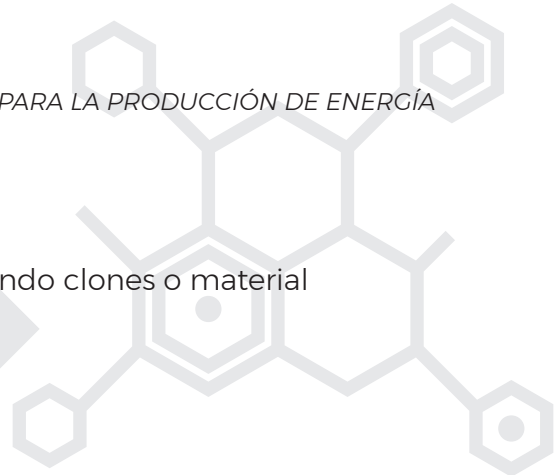
Ante la limitada información científica sobre las características de la biomasa obtenida de plantaciones energéticas maderables y sobre el comportamiento de dicha biomasa durante procesos de gasificado, es necesario ilustrar el proceso de investigación para generar información científica con biomasa proveniente de plantaciones energéticas y conocer su comportamiento en diferentes edades (0.5 y 1 año de edad) en el proceso de gasificación.

PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

En el Cuadro 7 se muestran los aspectos principales de un abordaje metodológico para cumplir con el objetivo de aumentar la eficiencia energética de biomasa proveniente de plantaciones energéticas mediante el proceso de gasificación.

CUADRO 7: OBJETIVOS, PRODUCTOS Y ACTIVIDADES DENTRO DE UN PROCESO DE INVESTIGACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE LA BIOMASA DE PLANTACIONES DENDROENERGÉTICAS.

OBJETIVO ESPECÍFICO	PRODUCTOS	ACTIVIDADES
<p>Determinar la productividad de una plantación energética utilizando clones o material genético superior bajo tres densidades de siembra.</p>	<p>Plantación energética establecida con clones o material genético superior y bajo tres densidades.</p> <p>Turno de rotación de la plantación energética.</p>	<p>Establecer la plantación energética con clones o material genético superior y bajo tres densidades de siembra (10,000, 15,000 y 20,000 n/ha).</p>
<p>Determinar las propiedades físicas, energéticas y de biomasa provenientes de las plantaciones energéticas.</p>	<p>Tabla con las propiedades físicas, energéticas y de biomasa por cada densidad de plantación y clon utilizado.</p> <p>Publicación en revista indexada.</p>	<p>Realizar el muestreo semestral de la plantación energética.</p> <p>Determinar las propiedades físicas (diámetro, altura, densidad y peso específico) de cada clon y densidad de plantación en cada muestreo.</p> <p>Determinar las propiedades energéticas (poder calórico, cenizas, volátiles y contenido de humedad) de cada clon y densidad de plantación en cada muestreo.</p> <p>Determinar la biomasa (ton/ha de biomasa en fuste, ramas, corteza y hojas, producción energética. GJ/ton/ha de biomasa en fuste y ramas) de cada clon y densidad de plantación en cada muestreo.</p> <p>Preparación de artículo científico</p>
<p>Determinar la eficiencia del proceso de gasificado y la composición del syngas producido.</p>	<p>Tabla con los porcentajes de eficiencia y la composición del syngas del proceso de gasificado por densidad y muestreo.</p> <p>Publicación en revista indexada.</p>	<p>Realizar el proceso de gasificación de cada muestreo, para cada clon y densidad de plantación.</p> <p>Determinar los porcentajes de eficiencia durante el proceso de gasificación de cada muestreo, para cada clon y densidad de plantación.</p> <p>Determinar la composición del syngas producido durante el proceso de gasificación de cada muestreo, para cada clon y densidad de plantación.</p> <p>Preparación de artículo científico.</p>



OBJETIVO ESPECÍFICO 1:

Determinar la productividad de una plantación energética utilizando clones o material genético superior bajo tres densidades de siembra.

ESTABLECIMIENTO DE PLANTACIÓN DENDROENERGÉTICA

Se establecerá una plantación energética bajo tres densidades de siembra de 10,000, 15,000 y 20,000 árboles por hectárea con clones o material genético superior. Se seleccionan estas densidades debido a que en estudios previos (Tenorio *et al.* 2016) se muestra que las mejores densidades de plantación se encuentran entre 10,000 y 15,000 árboles/hectárea. La plantación será establecida en un sitio representativo y muy cercano donde se encuentre instalado el gasificador. Para el establecimiento y mantenimiento de la plantación se contará con la ayuda del personal de la universidad. La plantación será dividida en 18 unidades de muestreo (3 densidades x 2 clones o procedencias x 3 repeticiones) con un área por parcela de 160m². La selección de los clones o material genético superior se realiza siguiendo los intereses de la universidad, buscando el material que ha tenido mejor desempeño en relación a la producción de volumen y mayor densidad.

DETERMINACIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD

La productividad será evaluada considerando la producción de biomasa por unidad de superficie, toneladas por hectárea. Así mismo la evaluación de este parámetro se llevará a cabo cada 6 meses en un período total de 1.5 años. En cada unidad experimental serán muestreados cinco árboles (2 clones o procedencias x 3 espaciamientos x 3 bloques x 5 árboles = 90 árboles), a los cuales se les determinará su diámetro, altura y la biomasa contenida en las diferentes partes del árbol (hojas, ramas y fuste). La determinación de estas variables se realizará siguiendo el procedimiento detallado por Tenorio *et al.* (2016). Luego estos parámetros serán proyectados para calcular la biomasa por hectárea para cada tipo de densidad de plantación y material genético.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Los valores de biomasa determinados en el muestreo, serán utilizados para establecer la densidad y material genético con las mejores características para la producción de biomasa. Así mismo con esta información será posible establecer cuáles son los valores energéticos en relación a la producción de calor (MJ/ha), detallado en la metodología del objetivo específico 2, y a la producción de syngas que será detallado en la metodología del objetivo específico 3.

OBJETIVO ESPECÍFICO 2:

Determinar las propiedades físicas, químicas y de biomasa provenientes de las plantaciones energéticas.

MUESTREO DE ÁRBOLES EN LA PLANTACIÓN Y MUESTREO EN EL ÁRBOL:

De cada unidad de muestreo será extraída una muestra de las diferentes partes del árbol (hojas, ramas y fuste). En el caso del fuste serán extraídas seis secciones transversales de 10cm de largo en tres diferentes alturas: dos muestras en la base del árbol, dos muestras en la altura total y dos muestras al 50% de la altura total. Todo el material de las diferentes partes será molido para realizar las diferentes determinaciones.

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD, PESO ESPECÍFICO Y DENSIDAD VERDE:

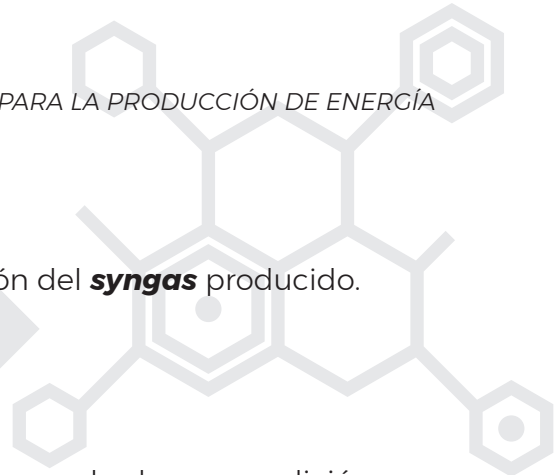
Para el cálculo del contenido de humedad (MC) de las hojas, ramas y fuste se utilizará la norma ASTM D-4442 (ASTM, 2007). Y para la determinación del peso específico en el fuste, se utilizará la norma ASTM D-143 (ASTM, 2014).

DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS:

El material granulado del fuste (madera y corteza) será utilizado en la determinación de las características químicas de porcentaje de Carbono (C), Nitrógeno (N) y la relación C/N, así mismo el análisis de los macro y micro elementos contenidos en la biomasa, se llevaron a cabo en el laboratorio de suelos de la universidad. Las características energéticas de poder calórico, porcentaje de cenizas y porcentaje de volátiles también serán determinados. El poder calórico se determinará usando la prueba calorimétrica de Parr's mediante la norma ASTM D-5865 (ASTM, 2004), el porcentaje de cenizas se llevará a cabo siguiendo el procedimiento detallado en la norma ASTM D 1102 (ASTM, 2013c) y para el porcentaje de volátiles se seguirá la norma ASTM D1762 (ASTM, 2013d).

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Las distintas propiedades detalladas anteriormente se realizarán para cada densidad y material genético, de forma que permita establecer cuál será la densidad y el material genético con las mejores condiciones de biomasa para producir calor o bien en el proceso de gasificado detallado a continuación.



OBJETIVO ESPECÍFICO 3:

Determinar la eficiencia del proceso de gasificado y la composición del **syngas** producido.

MUESTREO Y PREPARACIÓN DEL MATERIAL

De cada uno de los muestreos semestrales de la plantación serán cosechados en condición seca de cada densidad y material genético utilizado, aproximadamente 40 kilos de madera para ser utilizados en el proceso de gasificado.

El material cosechado en condición verde será astillado. El tamaño de la astilla debe ser de 2-3cm ancho, 1cm de espesor y 5-6cm de largo. Estas astillas deben ser secadas a 12% de contenido de humedad. El astillado y el secado se realizará en los equipos existentes la universidad.

Equipo de prueba de gasificación.

Se utilizará el equipo que dispone la universidad.

Prueba de gasificación.

De cada muestreo realizado (semestral) y para cada densidad de plantación se llevarán a cabo dos corridas de producción de gas en el gasificador, con una duración de al menos 1 hora en cada prueba. En esta prueba los variables que se medirán son: (i) Cantidad de material consumido por hora, (ii) variación de temperatura en el lecho fluidizado y salida de gas, (iii) flujo de gas y (iv) gas producido. Así mismo es necesario medir los diferentes componentes del gas luego de la gasificación, emisiones de CO, CO₂, H₂, CH₄ y N₂, principalmente.

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA

La información recolectada durante las pruebas y la información química de la biomasa detallada en el objetivo específico 2 permitirá determinar el índice de equivalencia de la biomasa (syngas producido/biomasa de entrada), índice de eficiencia (relacionada a tipo de biomasa). En la determinación de estos parámetros se seguirá el procedimiento detallado en Sharma y Sheth (2016) y Singh y Sekhar (2015).



*La ciencia es más
que un simple
conjunto de
conocimientos: es una
manera de pensar.*

Carl Sagan (1934 - 1996)



BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- ASTM D 1103-60 (1977). Método estándar para determinar Alfa-celulosa en la madera.
- ASTM D 1105-56 (1977). Método estándar para determinar Extraíbles en la madera.
- ASTM. (2014). D143-14. Standard test method for small clear specimens of timber. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM. (2007). D4442-07. Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Base Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM. (2013a). D1110-84. Standard test methods for water solubility of wood. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM. (2013b). D1107-96. Standard test method for ethanol-toluene solubility of wood. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM. (2004). D5865-04. Standard test method for gross calorific value of coal and coke. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM. (2013c). D1102-84. Standard test method for ash in wood. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- ASTM. (2013d). D1762-84. Standard test method for ash in wood. ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org
- Betters, D.R., Wright, L.L., Couto, L., (1991). Short rotation woody crop plantations in Brazil and the United States. *Biomass Bioenergy*. 1(6), p 305-316.
- BioNorm II, la investigación pre-normativa sobre biocombustibles sólidos para la mejora de las normas europeas, ORIENTACIÓN DIII.8: Procedimiento para la Planificación de la Calidad. Brown, H. P., Panshin, A.J. y Forsaith, C.C. (1952). *Textbook of wood technology*. Vol. 2. McGraw-Hill. New York Toronto London.

- Cunha, M. P., C., Pontes C. L., F., Cruz I., A., Cabral M. F., D., Cunha Neto. Z., B., & Barbosa A.P., R. (1989). Estudio Químico de 55 especies lenhosas para geracao de energía em caldeiras. In, 3°. Encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira. Anais, v.2. Sao Carlos, Brasil.
- DeBell, D. S., Clendenen, G. W., Harrington, C. A., Zasada, J.C., (1996). Tree growth and stand development in short-rotation *Populus* plantings: 7-year results for two clones at three spacings. *Biomass Bioenergy*. 11(4), p 253-269.
- Dickmann, D.L., (2006). Silviculture and biology of short rotation woody crops in temperate regions: then and now. *Biomass Bioenergy*. 30, p 696-705.
- Doat, J. (1977). Le Pouvoir Calorifique des Bois Tropicaux. Bois et Forets des Tropiques. Centre Technique Forestier Tropical. France. No. 172. 33-44 pp.
- Evans, A., Strezov, V., Evans, T.J., (2010). Sustainability considerations for electricity generation from biomass. *Renewable Sustainable Energy Rev*. 14, 1419-1427.
- FAO. (1997). The role of wood energy is Europe and OECD, WETT-Wood Energy Today for Tomorrow. Rome: FOPW, Forestry Department. 87 p.
- FAO, State of the world's forests, (2012), Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, (2012).
- Gokcol, C., Dursunb, B., Alboyaci, B. and Sunan, E. (2009). "Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey," *Energy Policy* 37, p 424-431.
- Hauk, S., Knoke, T., Wittkopf, S., (2014). Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—A review. *Renewable Sustainable Energy Rev*. 29, p 435-448.
- Hinchee, M., Rottmann, W., Mullinax, L., Zhang, C., Chang, S., Cunningham, M., Nehra, N., (2009). Short-rotation woody crops for bioenergy and biofuels applications. *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant*. 45(6), p 619-629.
- Holmbom, B. (1999). Extractives, pp 125-148 (In: Sjöström E, Alén R (1999) (Eds.) *Analytical methods in wood chemistry, pulping and papermaking*. Springer. Berlin.
- Holzforschung Austria, Forschungsinstitut und akkreditierte Prüf- und Überwachungsstelle der Österreichischen Gesellschaft für Holzforschung (ÖGH) (Wood Research Austria, Research Institute and accredited test and monitoring center of the Austrian Society for Wood Research).
- Ivaska, A., Harju, L. (1999). Analysis of inorganic constituents, pp 287-304 (In: Sjöström E, Alén R (1999) (Eds.) *Analytical methods in wood chemistry, pulping and papermaking*. Springer. Berlin. Kaliyan, N. and Morey, R.V. (2009). "Factors affecting strength and durability of densified biomass products," *Biomass Bioenergy* 33, p 337-359

- Kollmann, F. (1959). Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Ministerio de Agricultura Instituto Forestal de Investigaciones y experiencias, Madrid.
- Kullander, S., (2009). Energy from biomass. Eur Phys J Spec Top. 176, p 115-125.
- Kumar, T; Sheth, P. (2015). Biomass gasification models for downdraft gasifier. A state of the art review. Renewable and sustainable energy reviews. 50: p 583-593.
- Langheinrich, C., Kaltschmitt, M., (2006): Implementation and application of Quality Assurance systems. Biomass and Bioenergy, 30: p 915-922.
- Le Maire, G., Dupuy, S., Nouvellon, Y., Loos, R. A., Hakamada, R., (2014). Mapping short-rotation plantations at regional scale using MODIS time series: Case of eucalypt plantations in Brazil. Remote Sens. Environ. 152, p 136-149.
- Liu, Y., Xu, Y., Zhang, F., Yun, J., Shen, Z., (2014). The impact of biofuel plantation on biodiversity: a review. Chin. Sci. Bull. 59(34), 4639-4651.
- Luque, R., Herrero-Davila, L., Campelo, J.M., Clark, J.H., Hidalgo, J.M., Luna, D., Marinasa, J.M. and Romero, A.A. (2008). "Biofuels: a technological perspective," Energy Environ. Sci. 1, p 542-564.
- Martín, M., F. (1989). El carbón vegetal propiedades y obtención agroguías Mundiprensa. Madrid, España. pp. 13-21.
- Martín, M., F. (2001). Biocombustibles sólidos de origen forestal. AENOR. Madrid, España.
- Martin, R.E. y Gray, G.R. (1971). pH of southern pine barks. Forest Products Journal 21(3): 49-52.
- Moya, R., Tenorio, C., (2013). Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. Biomass Bioenergy. 56, p 14-21.
- Navarro-Camacho, R., Esquivel-Segura, E., Briceño-Elizondo, E., Arias-Aguilar, D., (2014). Estimating aboveground biomass for Eucalyptus saligna Sm. and Eucalyptus camaldulensis Dehn in the center region of Costa Rica. Revista Forestal Mesoamericana Kurú. 11(27), p 22-33.
- Nemestothy, N., (2012): Grundlagen für die Normung sowie Optimierung von Herstellung und Nutzung von Hackgut. BFW-Praxisinformation 28: 21 - 23 (Principles for the standardization and optimization of production and usage of wood chips).
- Perez JF, Melgar A, Benjumea PN. (2012). Effect of operating and design parameters on the gasification/combustion process of waste biomass in fixed bed downdraft reactors: an experimental study. Fuel. 96:487-96.
- Plis P, Wilk RK. (2011). Theoretical and experimental investigation of biomass gasification process in a fixed bed gasifier. Energy. 36:3838-45.

- Ruiz, JA; Juárez, MC; Morales, MP; Muñoz, P; Mendivil. MA. (2013). Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and sustainable energy reviews*. 18: p 174-183.
- Runkel, R.O.H. y Wike, K.D. 1951. Zur Kenntnis des thermoplastischen Verhaltens von Holz Roh Werkstoff. 9:260, 270.
- Sandermann, W. y Rothkamm, M. (1959). Über die Bedeutung der pH-Werte von Handelshölzern und deren Bedeutung für die Praxis. *Holz Roh- Werkst.* 17: p 433-440.
- Singh, V. C. J., & Sekhar, S. J. (2015). Performance studies on a downdraft biomass gasifier with blends of coconut shell and rubber seed shell as feedstock. *Applied Thermal Engineering* 97: 22-27.
- Sharma, S., & Sheth, P. N. (2016). Air-steam biomass gasification: Experiments, modeling and simulation. *Energy Conversion and Management*, 110, p 307-318.
- Stelte, W., Clemons, C., Holm, J.K., Sanadi, A.R., Ahrenfeldt, J., Shang, L. and Henriksen, U.B. (2011a). "Pelletizing properties of torrefied spruce," *Biomass Bioenergy* 35, 4690-4698.
- TAPPI. (2000). Tappi Test Methods. TAPPI Press. Atlanta.
- Tenorio, C; Moya, R; Tomazello Filho, M; Valaert, J. (2015). Quality of pellets made from agricultural and forestry crops in Costa Rican tropical climates. *BioResources*, 10(1): p 482-498.
- Tenorio, C; Moya, R; Arias-Aguilar, E; Briceño-Elizondo, E. (2016). Biomass yield and energy potential of short-rotation energy plantations of *Gmelina arborea* one year old in Costa Rica. *Industrial Crops and Products*. 82: p 63-73.
- UNE-EN 14775. (2010). Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas. AEN/CTN 164 Biocombustibles sólidos CONFEMADERA, AENOR, Grupo 9, Madrid, España, Sept. 2010, 10p.
- Vassilev SV, Baxter D, Andersen LK, Vassileva CG, Morgan TJ. (2012). An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*. 94:1-33.
- Wise, (1946), in: Sanjuan Dueñas, R. (1991). Guía práctica para la especialidad en celulosa y papel. Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Guadalajara.
- Zou W, Song C, Xu S, Lu C, Tursun Y. Biomass gasification in an external circulating countercurrent moving bed gasifier. *Fuel*, Available on-line June (2012) 10.1016/j.fuel. (2012).06.061.



Ingeniería en
Energías
Renovables