



Ingeniería en  
**Energías**  
Renovables

# USO DE LA BIOMASA FORESTAL Y RESULTADOS DE PROPIEDADES DENDROENERGÉTICAS PARA ESPECIES DE INTERÉS



**USO DE LA BIOMASA FORESTAL Y RESULTADOS DE PROPIEDADES  
DENDROENERGÉTICAS PARA ESPECIES DE INTERÉS**

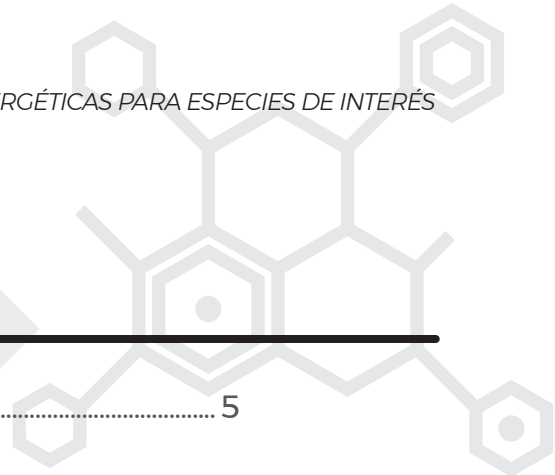
**AUTOR:**

**ROGER MOYA ROQUE Ph. D.**  
*PROFESOR E INVESTIGADOR*

**RECONOCIMIENTO TÉCNICO:**

**CÉSAR AUGUSTO ALVARADO**  
**SANDRA ELIZABETH CERRATO**

**DICIEMBRE 2017**




# CONTENIDO

---

INTRODUCCIÓN .....	5
ORIGEN BIOLÓGICO LA BIOMASA Y TIPOS DE BIOMASA.....	7
FOTOSÍNTESIS .....	7
BIOMASA .....	8
TIPOS DE BIOMASA .....	8
COMPOSICIÓN DE LA BIOMASA.....	9
LA BIOMASA COMO MATERIAL.....	9
ESTRUCTURA CELULAR .....	14
PARÁMETROS A EVALUAR EN LA BIOMASA.....	17
PROCESO DE COMBUSTIÓN.....	17
CAPACIDAD CALÓRICA O VALOR DE ENERGÍA DE LA BIOMASA.....	17
HUMEDAD EN LA BIOMASA .....	19
SECADO DE LA BIOMASA .....	23
EFECTO DEL AGUA EN EL CALOR.....	23
MODELO DE SECADO DE LA BIOMASA.....	24
PROCESO DE SECADO.....	25
INDUSTRIALIZACIÓN DE LA BIOMASA .....	27
INDUSTRIALIZACIÓN DE LA BIOMASA .....	27
UBICACIÓN DE LA BIOMASA, COSECHA Y RECOLECCIÓN .....	27
TRANSPORTE.....	28
ALMACENAMIENTO.....	29
SECADO.....	29
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	33





*La ciencia siempre  
vale la pena porque  
sus descubrimientos,  
tarde o temprano,  
siempre se aplican.*

Severo Ochoa (1905-1993)





# INTRODUCCIÓN


---

Actualmente la mayor demanda de energía en el mundo es suministrada por combustibles fósiles (George & Cowie, 2011 y Khanal *et al*, 2010), esto ha provocado un incremento del dióxido de carbono y otros gases, que contribuyen al calentamiento global provocando problemas ambientales y socioeconómicos (Kim *et al*, 2013 y Liu *et al*, 2012). De acuerdo a la Administración de Información de Energía de los Estados Unidos (USEIA), se proyecta que dentro de 20 años el consumo mundial de energía aumentará un 50% y el principal suministrador de energía será el combustible fósil (Kim *et al*, 2013).

Ante la necesidad de reducir las emisiones de efecto invernadero y la dependencia de los combustibles fósiles en el mundo, surge la bioenergía como alternativa renovable en la producción de energía (Khanal *et al*, 2010; Kasmoui & Ceulemans, 2013 y Stoof *et al*, 2015). La bioenergía es la energía que proviene de fuentes de biomasa, incluidos cultivos energéticos, residuos y subproductos de la agricultura, producción de alimentos y silvicultura (Offermann *et al*, 2011). Según Dale *et al* (2013) y Stoof *et al* (2015), la biomasa es la única materia prima renovable que puede actuar como complemento o reemplazo del combustible.

Sin embargo; para desarrollar la energía a partir de biomasa, es necesario conocer adecuadamente las propiedades, el procesamiento, calidad y demás aspectos relacionados a este tipo de fuente energética. Bajo este contexto, este manual tiene como objetivo mostrar los aspectos relacionados con las características y procesamiento de la biomasa, para fines bioenergéticos.





*En principio, la  
investigación necesita  
más cabezas que  
medios.*

*Severo Ochoa (1905-1993)*



# ORIGEN BIOLÓGICO LA BIOMASA Y TIPOS DE BIOMASA

## OBJETIVO:

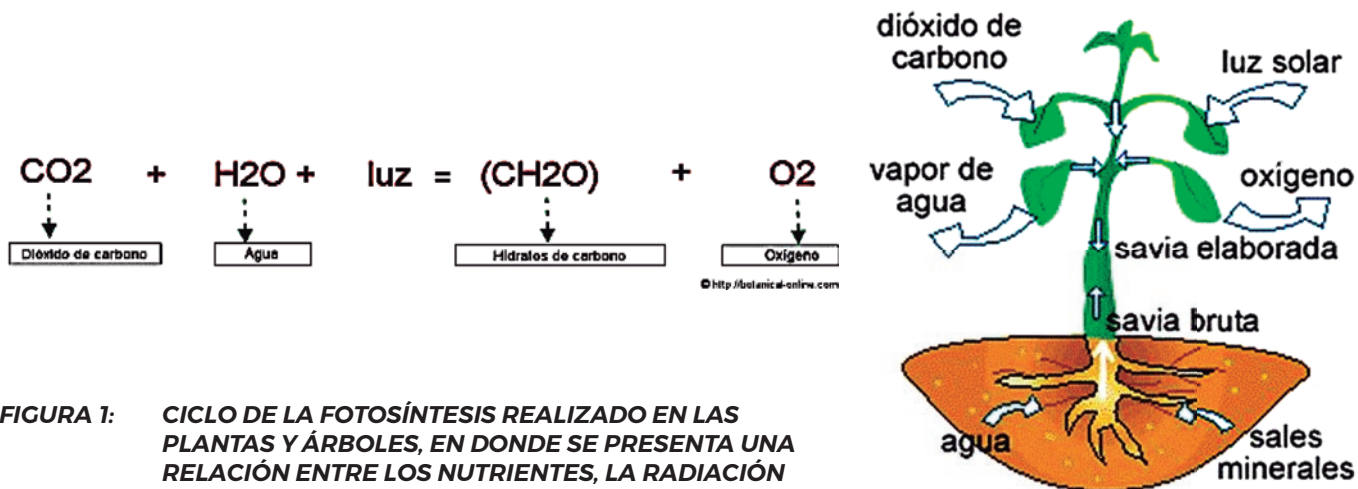
Conocer el proceso de formación de la biomasa por medio de la endroenergía para la producción de calor.

## DESARROLLO DE LA UNIDAD

Para trabajar con la biomasa y comprender su adecuado procesamiento, es necesario el conocimiento de dos términos:

## FOTOSÍNTESIS

La fotosíntesis es proceso biológico realizado por las plantas y árboles, en el cual a partir de la radiación solar y en combinación con el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera, el agua y una serie de nutrientes que generalmente están en el suelo se produce y almacena biomasa (**Figura 1**).



**FIGURA 1:** CICLO DE LA FOTOSÍNTESIS REALIZADO EN LAS PLANTAS Y ÁRBOLES, EN DONDE SE PRESENTA UNA RELACIÓN ENTRE LOS NUTRIENTES, LA RADIACIÓN SOLAR Y LAS CONDICIONES AMBIENTALES.

**FUENTE:** [HTTP://FOTOSINTESISMA.BLOGSPOT.COM/](http://fotosintesisma.blogspot.com/)



# BIOMASA

El material derivado de animales, plantas y árboles es el resultado de la conversión del proceso fotosintético; material compuesto principalmente por carbono, oxígeno e hidrógeno, el cual forma la celulosa, lignina y hemicelulosa. Puede ser utilizada como fuente de energía sostenible, posterior a su cosecha, al mismo tiempo mitiga los efectos del cambio climático al almacenar carbono.

La biomasa es considerada la materia prima más antigua utilizada para la producción de calor, nuestros antepasados la utilizaron para hacer las primeras exploraciones nocturnas, dar una temperatura adecuada para el cuerpo y el cocimiento de los alimentos. Este tipo de energía era considerada de combustión directa; sin embargo, en la actualidad se han desarrollado procesos más eficientes y limpios para la conversión de biomasa en energía, por ejemplo a través de la gasificación (producción de gas) o pirolisis (carbonización).

## TIPOS DE BIOMASA

Existen distintos tipos de biomasa, los cuales se pueden industrializar según la disponibilidad y procedencia (**Cuadro 1**):

- **Cultivos para producir biomasa:** son plantas o árboles que se cultivan con el objetivo de ser utilizados para la producción de energía, por ejemplo árboles, girasol, maíz, forrajes, entre otros.
- **Residuos post-cosecha:** residuos producto de la cosecha de un producto principal, ya sea de aserraderos, cultivo de piña, palma aceitera, maíz, entre otros.
- **Desechos industriales:** residuos provenientes de todo tipo de carnes y vegetales cuyo tratamiento como desechos representan un costo considerable para la industria.
- **Desechos urbanos:** los centros urbanos generan una gran cantidad de biomasa en muchas formas, por ejemplo en residuos alimenticios, papel, cartón, madera y aguas negras.

**CUADRO 1: CLASIFICACIÓN DE LA BIOMASA POR TIPO DE RESIDUO.**

BIOMASA	TIPO DE RESIDUO
Residuos forestales	Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas. Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas. Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces.
Residuos agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales. Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café). Estiércol. Residuos de cosechas: tallos y hojas, cáscaras, maleza, pastura.
Residuos industriales	Pulpa y cáscara de frutas y vegetales. Residuos de procesamiento de carnes. Aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales. Grasas y aceites vegetales.
Residuos urbanos	Aguas negras. Desechos domésticos orgánicos (cáscara de vegetales). Basura orgánica (madera).

*Costa Rica al igual que Honduras por ser países tropicales, presentan condiciones de temperatura y precipitación óptimas para la producción de biomasa; sin embargo, su procesamiento dependerá de la disponibilidad y la factibilidad de centralarla en un sitio para su industrialización. Algunos ejemplos de biomasa que puede ser producida y procesada en nuestro país para la producción de bioenergía son: bagazo de caña, pulpa de banano, cascarilla de café, pollinaza, aserrín, leña, cascarilla de arroz.*



# COMPOSICIÓN DE LA BIOMASA

---

## OBJETIVO:

Conocer la biomasa desde el punto de vista orgánico, químico y celular de la madera o tejido.

## DESARROLLO DE LA UNIDAD

## LA BIOMASA COMO MATERIAL

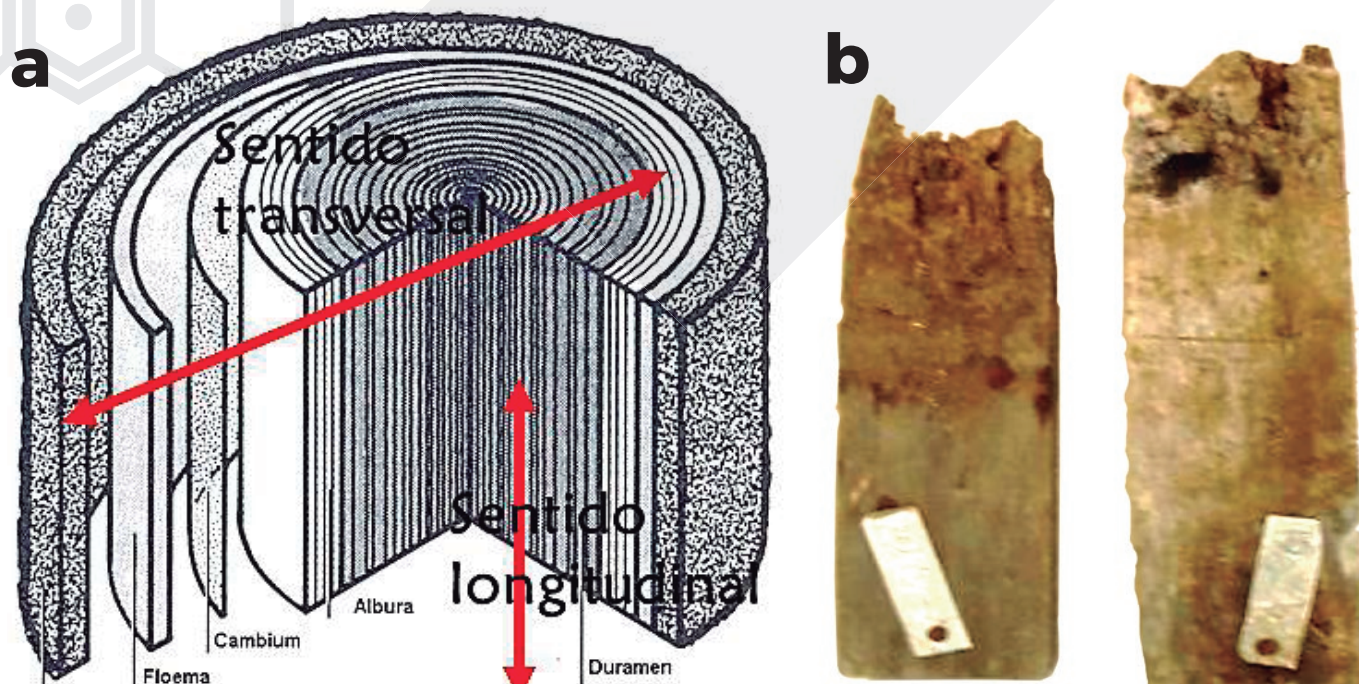
La biomasa debe ser estudiada en tres diferentes dimensiones: su origen biológico, la naturaleza química y su estructura celular.

**EL ORIGEN BIOLÓGICO:** La madera a diferencia de otros materiales de construcción, es un material que es sintetizado por medio de un ser vivo, específicamente por un árbol, en el cual se utilizan los recursos del aire y el suelo, y se los combina en un proceso llamado fotosíntesis que se lleva a cabo en el tejido foliar del árbol, para producir el xilema (madera).

Es debido a esta naturaleza que la madera presenta:

**VARIABILIDAD:** Es un material anisótropico, cambia con el plano en que se estudie. Por ejemplo, las propiedades de la madera son diferentes en sentido longitudinal del árbol, en comparación con las propiedades en sentido transversal (Figura 2a). Así mismo, en el sentido transversal, presenta diferentes propiedades que en sentido tangencial y en sentido radial. La variabilidad también puede ser encontrada en diferentes edades, épocas del año o altura del árbol. Esta heterogeneidad del material es producida porque las condiciones de crecimiento donde se desarrolla el árbol, cambian con el tiempo y la forma que se desarrolla la madera en las diferentes alturas del árbol.





**FIGURA 2. SENTIDO DE VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA MADERA EN EL ÁRBOL: VARIACIÓN EN SENTIDO TRANSVERSAL Y EN SENTIDO LONGITUDINAL.**

**FUENTE:** (A) HAYGREEN Y BOWER, 1996 Y (B) ROGER MOYA ROQUE

**SUSCEPTIBILIDAD AL DETERIORO:** La biomasa está compuesta por una serie de polímeros la cual la hace apetecible a algunos organismos (hongos o insectos) para su desarrollo o bien como fuente de alimento. Esta propiedad, junto con la susceptibilidad ante el fuego, son las principales debilidades que se le señalan a la madera (**Figura 2b**).

**NATURALEZA ORGÁNICA:** La biomasa está compuesta por una serie de elementos químicos, que van desde macromoléculas, también de tipo poliméricas, como celulosa, hemicelulosa y lignina (Figura 3) y extractivos que pueden ser solubles en agua o solventes inorgánicos como el etanol, diclorometano e hidróxido de sodio. La cantidad de estos compuestos son mostrados en el (Cuadro 2) Estos polímeros están formados principalmente de carbono, hidrogeno y oxígeno. Aparte de estos elementos se presentan otra serie de compuestos químicos con menor proporción, que son catalogados como micro o macro-elementos, que por lo general corresponde a metales (**Cuadro 2 y 3**).

CUADRO 2: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ALGUNAS BIOMASAS DE PLANTACIÓN DE

PROPIEDAD	ELEMENTO QUÍMICO	<i>Cupressus lusitanica</i>	<i>Gmelina arborea</i>	<i>Tectona grandis</i>
Composición global	Celulosa (%)	64.7	55.6	54.4
	Lignina (%)	31.4	24.2	21.9
	Cenizas (%)	0.18	0.96	2.81
Extractivos solubles en	Agua caliente (%)	8.01	8.97	3.13
	Agua fría (%)	4.29	7.81	3.28
	Etanol-tolueno	2.21	0.82	1.18
	Diclorometano	4.61	2.21	2.20
	Hidróxido de sodio	24.23	26.13	11.98
Macro y micro elementos	Nitrógeno (%)	0.33	0.24	0.20
	Fosforo (%)	0.00	0.00	0.04
	Calcio (%)	0.06	0.17	0.14
	Magnesio (%)	0.00	0.02	0.07
	Potasio (%)	0.02	0.38	0.05
	Azufre (%)	0.01	0.00	0.01
	Hierro (mg/kg)	36.67	15.85	0.33
	Cobre (mg/kg)	0.67	2.03	5.00
	Zinc (mg/kg)	0.00	10.26	2.00
	Manganeso (mg/kg)	0.00	0.78	0.00
	Boro (mg/kg)	1.67	1.82	2.67
Otros elementos	Carbono (%)	43.88	43.09	43.88
	Hidrogeno (%)	6.52	6.91	6.52
	Oxigeno (%)	47.60	48.00	47.60

Fuente: MOYA et al. (2010).

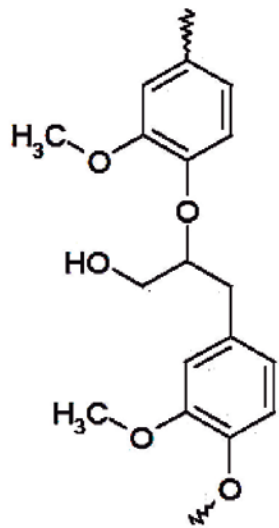
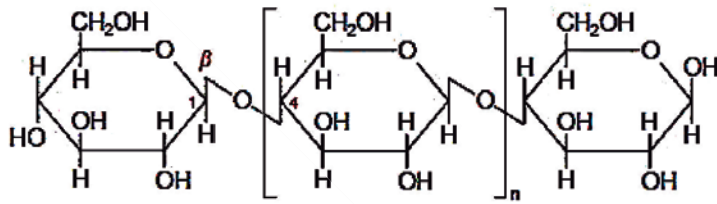


**CUADRO 3: CANTIDAD DE ELEMENTOS QUÍMICOS Y CONTENIDO DE CENIZAS PRESENTES EN DIFERENTES ESPECIES MADERABLES Y ESPECIES AGRÍCOLAS.**

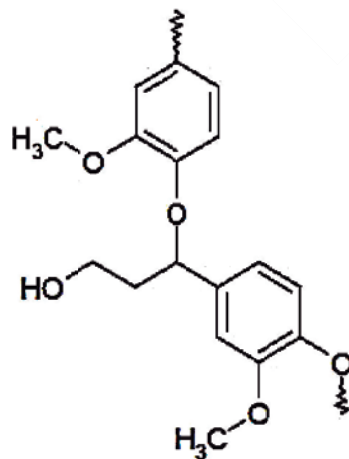
TIPO DE BIOMASA MADERA	PORCENTAJE DEL PESO (SIN HUMEDAD)						
	C	H	N	O	S	CL	CENIZA
Sauce	47,66	5.20	0.30	44.70	0.03	0.01	1.45
Madera suave	52,10	6.10	0.20	39.90	-	-	1.70
Corteza madera dura	50,35	5.83	0.11	39.62	0.07	0.03	3.99
Madera dura	50,48	6.04	0.17	42.43	0.08	0.02	0.78
Eucalipto	50,43	6.01	0.17	41.53	0.08	0.02	1.76
Roble	49,89	5.98	0.21	42.57	0.05	0.01	1.29
Corteza de pino	52,30	5.80	0.29	38.76	0.03	0.01	2.90
Aserrín pino	52,49	6.24	0.15	40.45	0.03	0.04	0.60
SUB-PRODUCTOS AGRÍCOLAS	C	H	N	O	S	CL	CENIZA
Brizna de trigo	39.07	4.77	0.58	50.17	0.08	0.37	4.96
Caña de azúcar	44.80	5.35	0.38	39.55	0.01	0.12	9.79
Bagazo de caña	46.95	5.47	0.38	39.55	0.01	0.12	9.79
Paja de arroz	39.65	4.88	0.92	35.77	0.12	0.50	18.16
Cascarilla de arroz	38.68	5.14	0.41	37.45	0.05	0.12	18.15
Paja de maíz	46.91	5.47	0.56	42.78	0.04	0.25	3.99
Olote de maíz	47.79	5.64	0.44	44.71	0.01	0.21	1.20
Fibra de coco	50.29	5.05	0.45	39.63	39.63	0.28	4.14
Carbón mineral	71.70	4.70	1.30	8.30	0.64	0.06	20.70



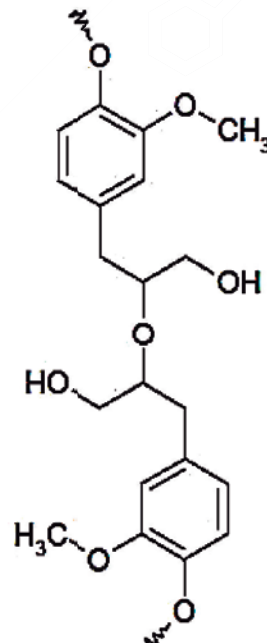
(a) celulosa



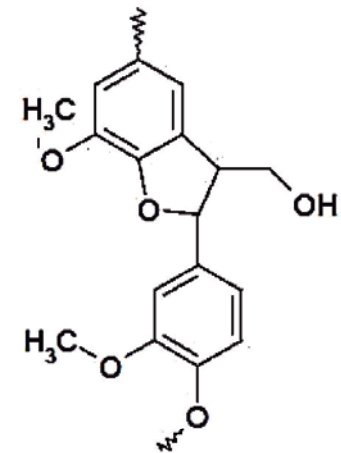
(b)  $\beta$ -O-4 lignina



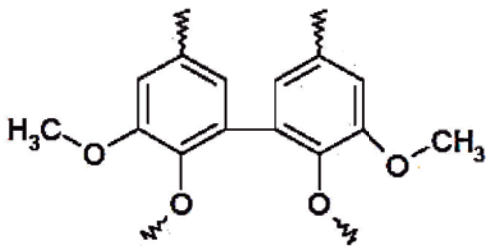
(c)  $\alpha$ -O-4 lignina



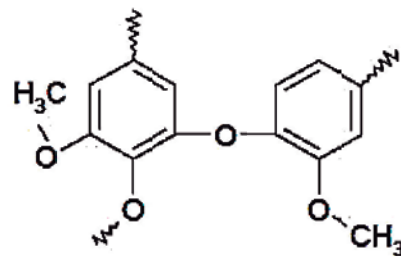
(d)  $\beta$ - $\beta$  lignina



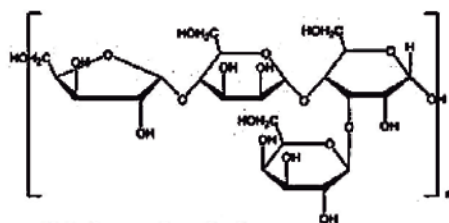
(g)  $\beta$ -5 lignina



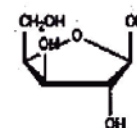
(e) 5-5 lignina



(f) 5-O-5 lignina



(h) hemicelulosa



(i) Xilosa

FIGURA 3: ESTRUCTURA GENERAL DE LA CELULOSA (A), LOS DIFERENTES TIPOS DE LIGNINA (B-G), ESTRUCTURA DE UNA HEMICELULOSA (H) Y XILOSA (I) QUE COMPONEN LA BIOMASA.

FUENTE: HANS-WALTER H (2005) Y DOHERTY ET AL. (2011), QIN, W. (2016).

En la naturaleza orgánica, nuevamente se establecen dos aspectos propios de la biomasa y que otros materiales no poseen:

**UNA SUSCEPTIBILIDAD AL DETERIORO:** La celulosa, hemicelulosa y lignina son polímeros que pueden ser procesados por algunos organismos (hongos o insectos), por lo que hacen que la madera sea susceptible a la degradación.

**COMBUSTIÓN:** Al suministrarle calor a la biomasa esta empieza a ganar energía, y cuando llega a los 270-275 °C ocurre el rompimiento de las cadenas de carbón, liberando la energía almacenada en esta, por lo que hay una combustión del material (ignición), y luego esta energía liberada suministra energía a las otras partes de la madera. Esta propiedad de combustión es la que muchos consideran como una debilidad de la madera, como material.

## ESTRUCTURA CELULAR

Como se ha indicado, la biomasa se compone de tres polímeros principales (celulosa, hemicelulosa y lignina). Estos polímeros tienen un orden en la biomasa que forman una matriz estructural de alta resistencia entre ellos y que demanda mucha energía para descomponerlas. El arreglo principal se forma en las cadenas de celulosa entrelazadas con las cadenas de las hemicelulosas, la lignina es la encargada de mantener unidas estas cadenas con las de celulosa (Figura 4).

Las cadenas de celulosa forman un polímero de varios milímetros de largo, hasta formar las microfibrillas. Estas microfibrillas están ordenadas paralelamente entre ellas, hay regiones que se presentan totalmente paralelas sin espacios entre las microfibrillas, y luego hay otras regiones que no presentan este alineamiento, dejando espacio entre las microfibrillas. A la primera región se le llama zona cristalina de la celulosa y a la segunda región se le llama zonas amorfas (Figura 4).

La acumulación de microfibrillas produce los elementos celulares de la madera, los cuales son de tres tipos diferentes: fibras, encargadas del soporte mecánica del árbol; los vasos, que son los elementos de conducción y el parénquima, que es el elemento de almacenamiento (Figura 4).

La naturaleza celular de la biomasa, establece cuatro aspectos propios, que otros materiales de construcción no tienen, como lo son:

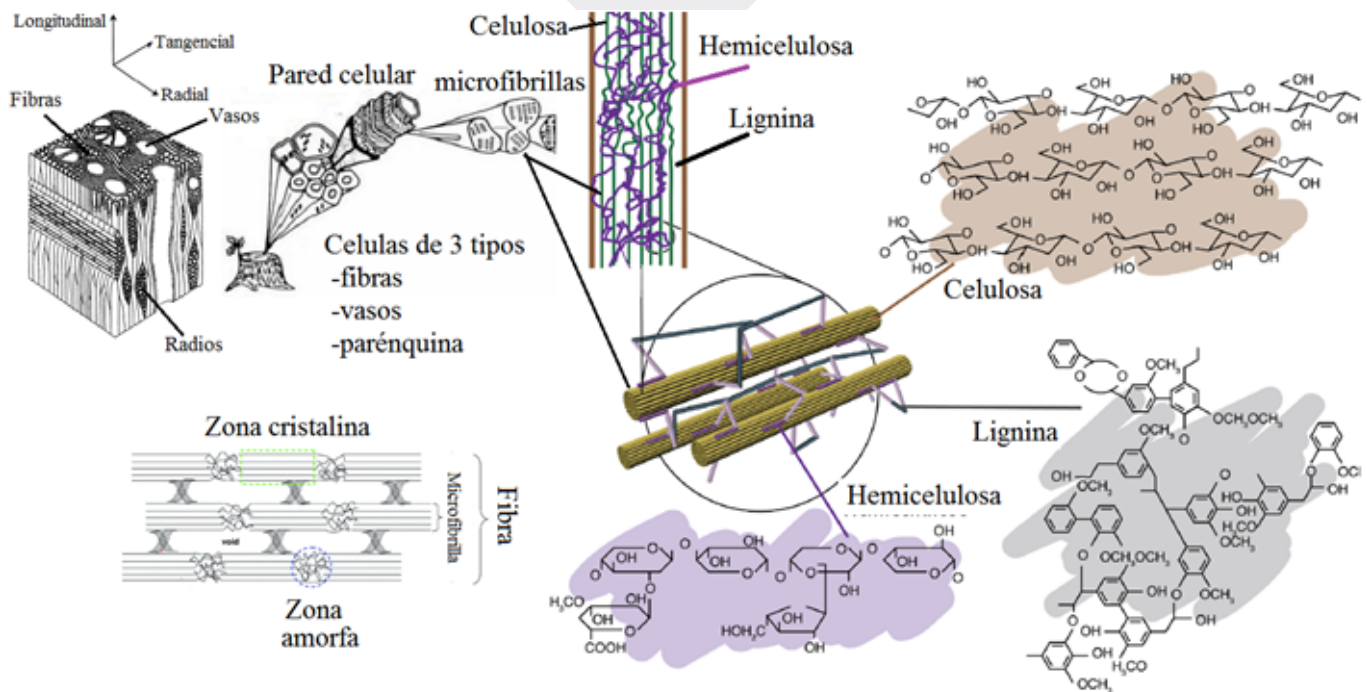
**Resistencia mecánica:** La estructura celular permite que la biomasa sea un material altamente resistente a la aplicación de fuerzas que intentan cambiar su forma. La madera es un material que, en comparación con otros, tiene una alta resistencia en relación a su peso. Por ejemplo, el concreto tiene valores de resistencia menor que la madera si se compara la relación masa (peso) - resistencia estructural.



**ANISOTROPÍA:** La biomasa en relación a otros materiales presenta diferentes propiedades según el plano que se estudie. La biomasa presenta una orientación tangencial, radial y longitudinal y las propiedades varían en el plano que se estudie.

**HETEROGÉNEO:** No es un material homogéneo como lo es el plástico, o el metal. Porque varía sus propiedades dependiendo de las partes que pueda tener una pieza de madera.


**POROSO:** La estructura celular que conforma la madera está compuesta de espacios muy pequeños, conocido como lúmenes; esto porque su estructura es porosa.



**FIGURA 4:** COMPOSICIÓN ESPACIAL DE LOS DIFERENTES POLÍMEROS QUE COMPONEN LA BIOMASA.

**FUENTE:** TUMULURU ET AL., 2011, FERNANDES, ET AL., 2012. GREIL, ET AL., 1998, LIN, ET AL., 2012.





*El fin de la ciencia  
especulativa es la  
verdad, y el fin de la  
ciencia práctica es la  
acción.*

*Aristóteles (384 A.C. - 322 A.C.)*





# PARÁMETROS A EVALUAR EN LA BIOMASA

---

## OBJETIVO:

Conocer los diferentes métodos utilizados para caracterizar las diferentes tipos de biomasa.

## DESARROLLO DE LA UNIDAD

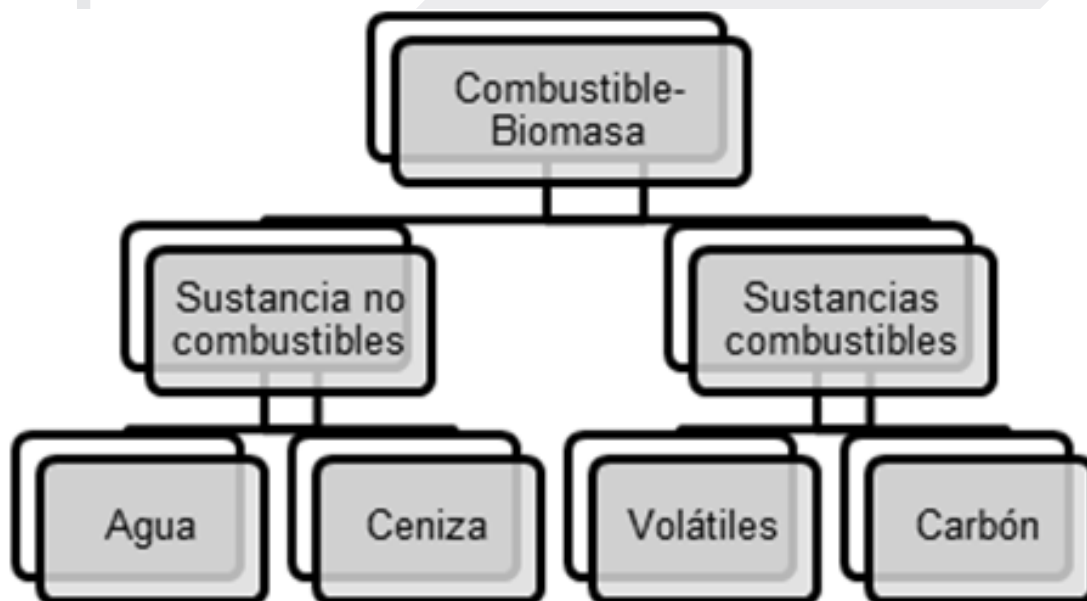
### PROCESO DE COMBUSTIÓN

El proceso de combustión de la biomasa consiste en someter la madera a un calentamiento inicial (temperatura de ignición), una vez aplicada la temperatura, se da la separación de los elementos químicos que la componen (carbono, oxígeno e hidrogeno) en forma de celulosa, lignina e hemicelulosas. En dicho proceso de separación hay una liberación de la energía, conocido técnicamente como combustión o popularmente como quemado de la biomasa. En este proceso de combustión se producen sustancias combustibles y materiales volátiles (gases o humo). El detalle del proceso de combustión se muestra en la **(Figura 5)**.

En la combustión se producen una serie de sustancias volátiles relacionadas a los elementos químicos que la contienen. En estas sustancias volátiles se pueden producir gases no adecuados para el medio ambiente. Por esa razón es que en muchos países regulan las emisiones durante el proceso de combustión o quemado.

### CAPACIDAD CALÓRICA O VALOR DE ENERGÍA DE LA BIOMASA

Este concepto está referido a la cantidad de calor que puede generar la biomasa y generalmente es representado en las unidades de energía por unidad de masa que tenga el material. En el caso de la biomasa, este valor puede variar según la especie y el grado de humedad que contenga la biomasa. La biomasa habitualmente se mide por la cantidad de calor suministrado por el poder calórico, el cual representa la energía de combustión del carbono e hidrógeno de la materia orgánica y del azufre pirético y en parte del orgánico. En este sentido se establecen dos tipos de mediciones de la energía suministrada por la biomasa, las cuales dependen del grado de humedad:



**FIGURA 5. CLASIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES GENERADOS DURANTE EL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LA BIOMASA.**

**FUENTE:** (MARUTZKY, SEEGER 1999)

**CUADRO 4: PODER CALÓRICO MÁXIMO PARA DIFERENTES TIPOS CON PRODUCCIÓN DE BIOMASA.**

TIPO DE BIOMASA	VALOR CALÓRICO BRUTO (MJ/KG)
<b>MADERA</b>	
Astilla de madera	20.89
Corteza de pino	20.95
Desechos industriales de madera	19.00
<b>SUB-PRODUCTOS AGRÍCOLAS</b>	
Paja de trigo	18.94
Caña	18.06
Bagazo	18.09
Cáscara de coco	18.69
Olote de maíz	17.72
Paja de arroz	15.61
Cascarilla de arroz	15.58
Aserrín	19.34

**PODER CALÓRICO BRUTO O CAPACIDAD CALÓRICA MÁXIMO:**

Es la energía contenida en el material o la cantidad de calor generada por una combustión completa de una masa específica de carbón en presencia de oxígeno. Aquí no hay presencia de agua, se expresa en unidades de calor por la masa del material. El Cuadro 4 detalla el poder calórico máximo para diferentes tipos de biomasa.

**PODER CALÓRICO NETO:** Representa la energía liberada menos el calor que el material ha gastado en evaporar el agua contenida en la biomasa, por lo general está involucrada la cantidad de agua que presenta el material. En la Figura 6, se detalla este valor de poder calórico para especies maderables de plantación.



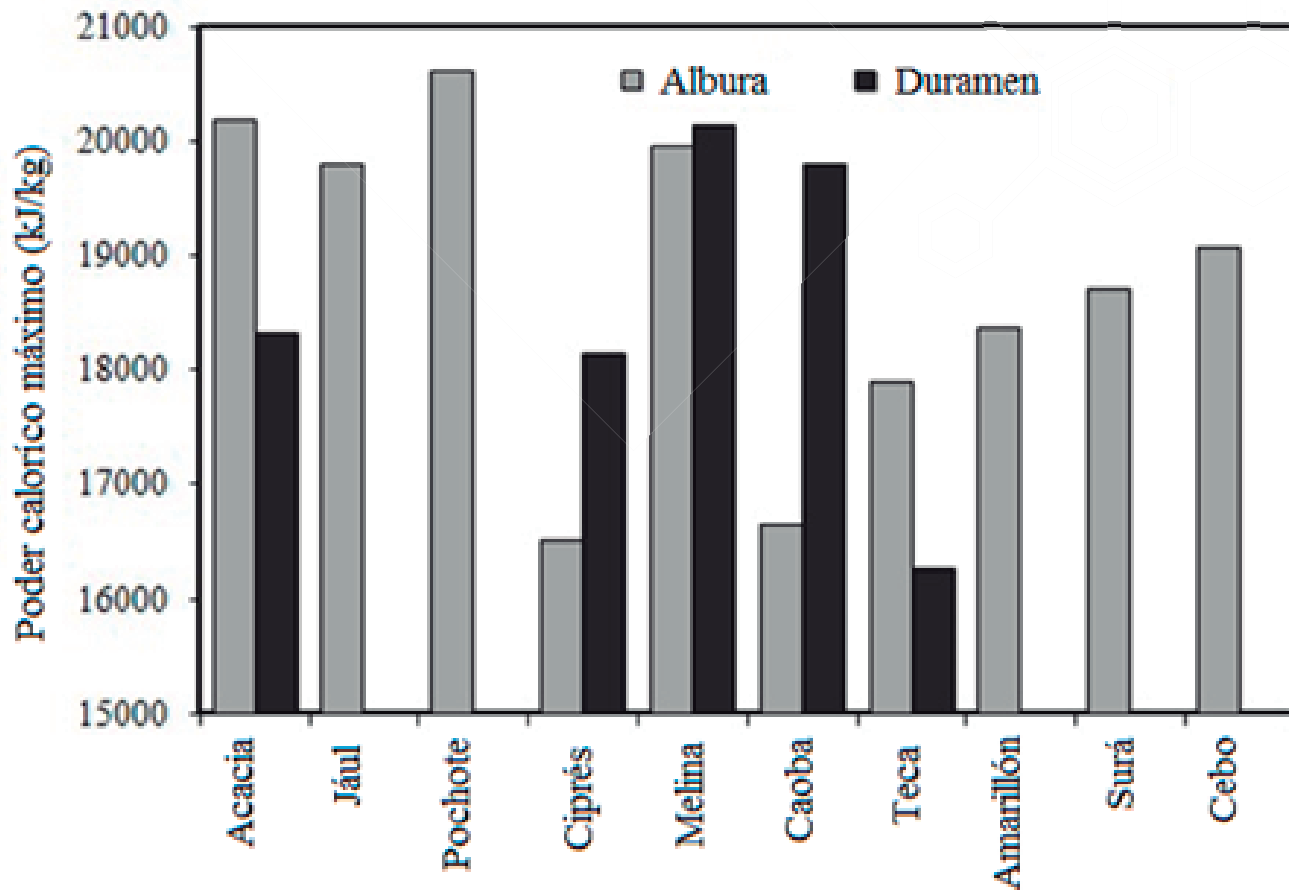


FIGURA 6: PODER CALÓRICO MÁXIMO EN LA ALBURA Y EL DURAMEN PARA DIFERENTES ESPECIES FORESTALES UTILIZADAS EN REFORESTACIÓN COMERCIAL DE COSTA RICA.

## HUMEDAD EN LA BIOMASA

La biomasa por tratarse de un material de origen biológico posee agua, la cual tiene incidencia directa en la cantidad de calor que suministra la biomasa. El agua disminuye la capacidad calórica de la biomasa, ya que una proporción de la energía generada por el material tiene que ser consumida en evaporar el agua presente en el material. Esa humedad, en el caso de su futura utilización, es necesario eliminarla para así tener una mayor eficiencia energética. Existen dos ecuaciones de cálculo para determinar la cantidad de agua en la biomasa: la primera se refiere al concepto humedad de la biomasa de una totalidad de peso (Ecuación 1) y la segunda va enfocada a determinar la humedad en relación a la materia seca de la biomasa (**Ecuación 2**).

### ECUACIÓN 1

$$\text{Contenido humedad (\%)} = \frac{\text{cantidad en peso de agua} \times 100}{\text{peso de madera sin agua}}$$

Humedad > o < a 100%

### ECUACIÓN 2

$$\text{Contenido humedad (\%)} = \frac{\text{cantidad en peso de agua} \times 100}{\text{peso de madera saturada agua}}$$

Humedad < a 100%

Por ejemplo, una muestra en condición recién cortada presenta un peso de 5,500 g y luego de secar la muestra a 100 °C por 24 horas, esta presenta un peso de 2,750 g. Seguidamente se presenta los valores de contenido de humedad en base seca y en base humedad.

$$\text{Contenido humedad en base seca (\%)} = \frac{(5,550 \text{ g} - 2,750 \text{ g}) \times 100}{2,750 \text{ g}} = 101.82 \%$$

$$\text{Contenido humedad en base húmeda (\%)} = \frac{(5,550 \text{ g} - 2,750 \text{ g}) \times 100}{5,550 \text{ g}} = 50.45 \%$$

## PORCENTAJE DE CENIZAS

Este parámetro indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material y por lo general tiene efectos negativos en el poder calórico o en el comportamiento de la caldera, ya que un alto contenido de este material demanda un esfuerzo mayor para eliminarla durante la combustión. Por ello en los procesos que incluyen la combustión de la biomasa, es importante conocer el porcentaje de generación de ceniza, ya que este involucra una mayor cantidad de limpieza. En algunos casos, ésta puede ser utilizada; por ejemplo, la ceniza de la cascarilla de arroz es un excelente aditivo en la mezcla de concreto o para la fabricación de filtros de carbón activado. Sin embargo, en otros tipos de biomasa no es posible su aprovechamiento debido a la presencia de una serie de sustancias nocivas.

## DENSIDAD APARENTE

Esta se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, por ejemplo aserrín o material molido, y que el volumen contiene espacios vacíos. Combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen, requiriéndose menores tamaños de los equipos y aumentando los períodos entre cargas. Por otro lado, materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte y, algunas veces, presentan problemas para fluir por gravedad, lo cual complica el proceso de combustión, y eleva los costos del proceso.

## MATERIALES VOLÁTILES

Los materiales volátiles, como se ha definido, son desprendimientos gaseosos de la materia orgánica e inorgánica durante el calentamiento o combustión de la biomasa. Y los materiales volátiles pueden contener sustancias como metano, dióxido de carbono, entre otros que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. Una biomasa debe contener bajo contenido de materiales volátiles para que mayor proporción de esta sea convertida en energía, por el contrario biomasa con alto contenido de material volátil no es adecuado para una buena combustión ya que una proporción de la energía es gastada para producir estos materiales volátiles. El (Cuadro5) presenta los valores de contenido de materiales volátiles para algunas tipos de biomasa de Costa Rica.

## CARBONO FIJO

El carbono que queda disponible en la biomasa luego de un proceso de pirolisis o carbonización; se obtiene por la diferencia de: contenido de material volátil, cantidad de cenizas y la cantidad de agua que tenga la madera. Este carbono generalmente es lo que se convierte en carbón durante el proceso de carbonización de la madera y varía de 16 a 25% dependiendo del tipo de biomasa (**Figura 7**).



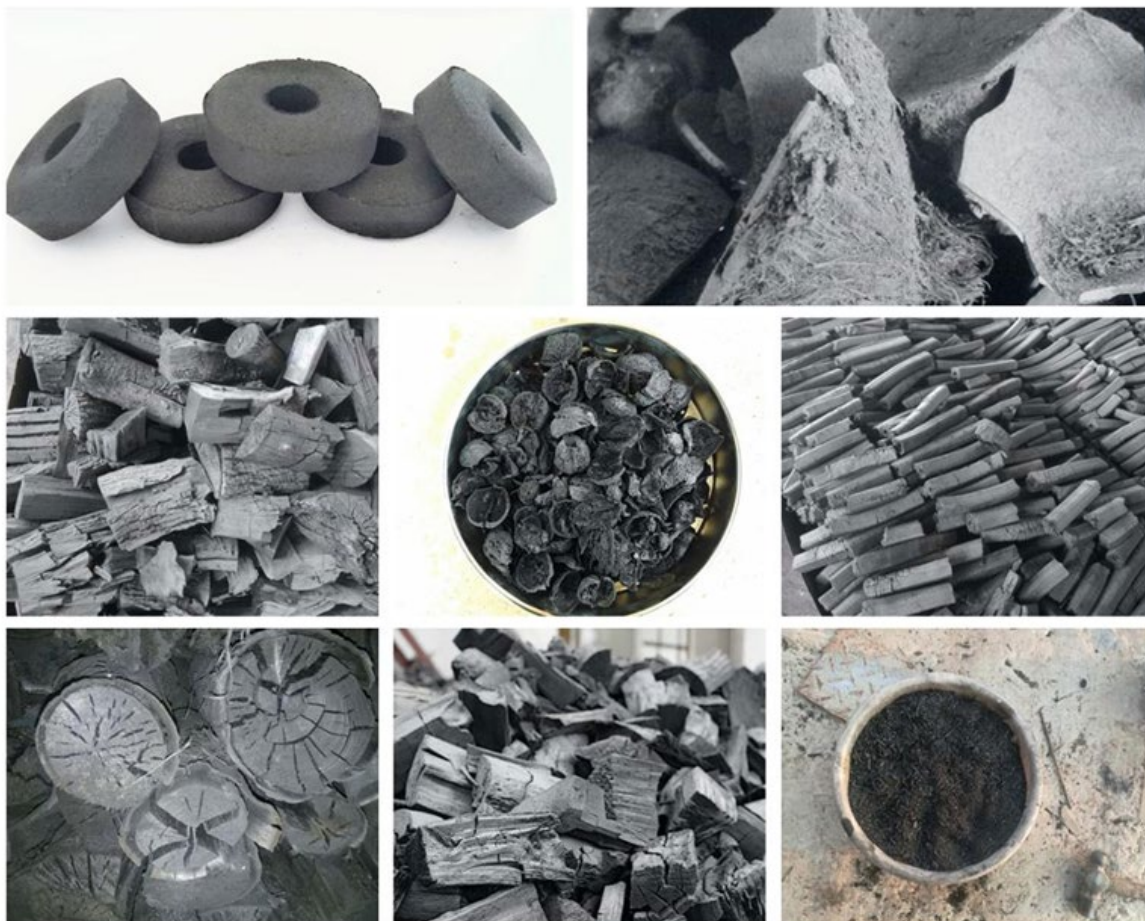
**CUADRO 5: PORCENTAJE DE CENIZA PARA DISTINTOS TIPOS DE BIOMASA ESTUDIADOS EN COSTA RICA.**

TIPO DE BIOMASA MADERA	PORCENTAJE DEL PESO CENIZA
Sauce	1.45
Madera suave	1.70
Corteza de madera dura	3.99
Madera dura	0.78
Eucalipto	1.76
Roble	1.29
Corteza de pino	2.90
Aserrín pino	0.60
SUB-PRODUCTOS AGRÍCOLAS	CENIZA
Brizna de trigo	4.96
Caña de azúcar	9.79
Bagazo de caña	9.79
Paja de arroz	18.16
Cascarilla de arroz	18.15
Paja de maíz	3.99
Olote de maíz	1.20
Fibra de coco	4.14
Carbón mineral	20.70

**CUADRO 6: CONTENIDO DE MATERIALES VOLÁTILES PRESENTES EN DIFERENTES TIPOS DE BIOMASA EN COSTA RICA.**

TIPO DE BIOMASA (ESPECIE)	NOMBRE COMÚN	MATERIALES VOLÁTILES (%)
<i>Arundo donax</i>	Arundo	70.5 <sup>DE</sup>
<i>Cupressus lusitanica</i>	Ciprés	76.7 <sup>AB</sup>
<i>Elaeis guineensis</i>	Pinzote de palma aceitera	71.7 <sup>CD</sup>
<i>Elaeis guineensis</i>	Fruto de palma aceitera	72.4 <sup>C</sup>
<i>Gynerium sagittatum</i>	Sorgo	75.1 <sup>B</sup>
<i>Pennisetum purpureun</i>	Zacate gigante	69.2 <sup>E</sup>
<i>Phyllostachys aurea</i>	Bambú	75.3 <sup>B</sup>
<i>Saccharum officinarum</i>	Caña de azúcar	78.0 <sup>A</sup>
<i>Sorghum bicolor</i>	Sorgo	72.6 <sup>C</sup>
<i>Tectona grandis</i>	Teca	75.9 <sup>B</sup>

**NOTA:** VALORES CON LETRAS SIMILARES INDICAN QUE SON ESTADÍSTICAMENTE IGUALES.



**FIGURA 7: CARBONIZACIÓN DE DIFERENTES MATERIALES BIOMÁSICOS.**



# SECADO DE LA BIOMASA



## OBJETIVO:

Conocer los diferentes métodos utilizados para secar la biomasa.

## DESARROLLO DE LA UNIDAD

# EFECTO DEL AGUA EN EL CALOR

El agua en la biomasa, como se ha mencionado disminuye el poder calórico de ésta, específicamente durante la combustión o quemado tiene un efecto absorbente de calor para realizar el proceso de evaporación del agua, por tanto disminuye la capacidad calórica. Es por esto que muchas veces antes de utilizar la biomasa es necesario secar esta madera hasta una humedad adecuada que permita la obtención de la mayor cantidad de energía con la menor cantidad de calor suministrado para el secado. Entonces se habla de un balance energético que presenta una ecuación de dos partes, por un lado, la energía que es necesaria para secar la biomasa y por otro la cantidad de energía que suministra la biomasa.

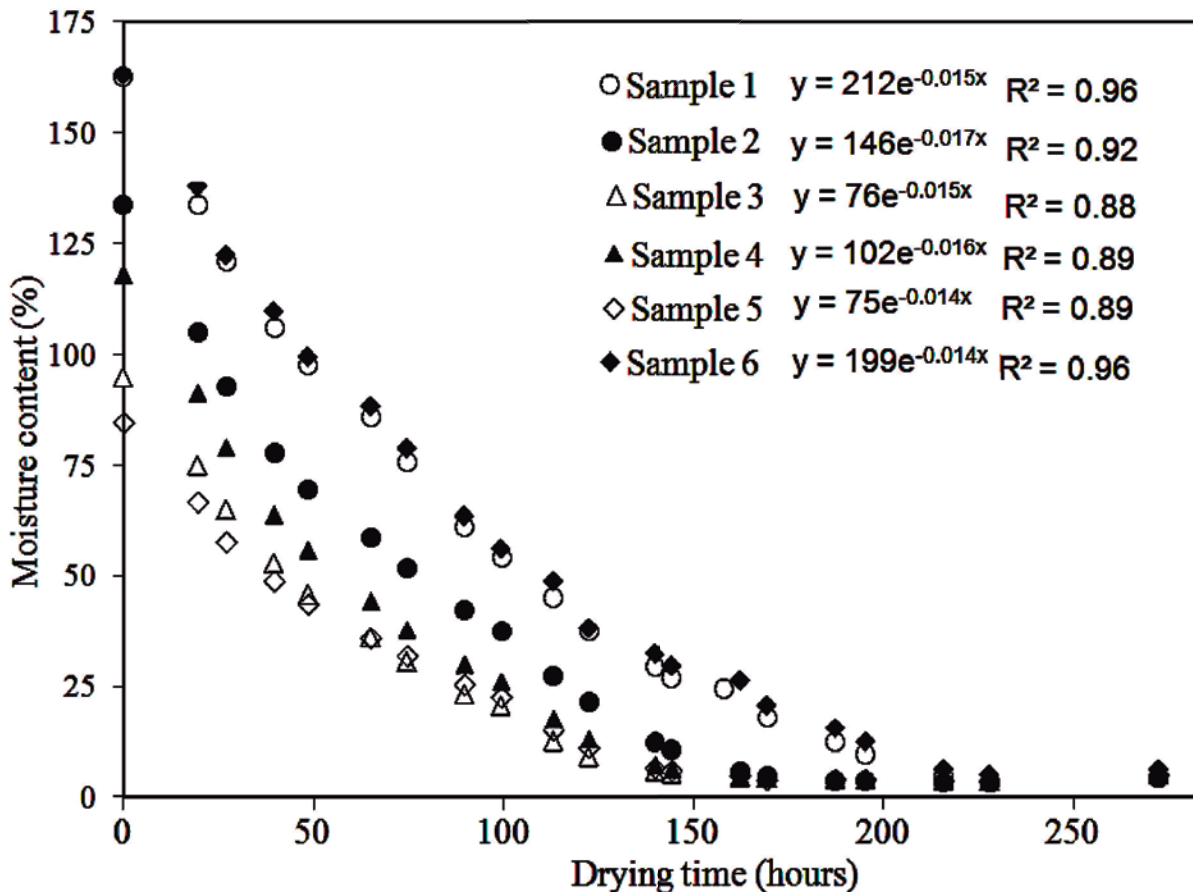
El secado de la biomasa es importante en muchos procesos de utilización de uso final que se le pueda dar. Por ejemplo en el pasado, cuando la leña de las podas de café era utilizada en el sector rural para cocinar, luego de la poda, esta era apilada para que la humedad bajará o se secara para posteriormente utilizar esta en el cocimiento de los alimentos en las casas. La figura 8 muestra los tipos de biomasa que necesitan secado durante la conversión de esta en diferentes tipos de utilización.



**FIGURA 8: DIFERENTES PROCESOS NECESARIOS PARA LA CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN DIFERENTES USOS.**

# MODELO DE SECADO DE LA BIOMASA

La disminución del secado en relación al tiempo de secado tiene una relación de la forma *Contenido de humedad (%) = contenido de humedad inicial \* e<sup>-tiempo\*b</sup>*. En la Figura 9 se presenta gráficamente el comportamiento del contenido de humedad de diferentes tipos de biomasa (tipo granulado) a 50 grados de temperatura. Todos ellos presentan una forma de secado como la fórmula anteriormente presentada.



**FIGURA 9:** COMPORTAMIENTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD CON RESPECTO AL TIEMPO DE SECADO PARA 6 TIPOS DE BIOMASA DE TIPO GRANULADO SEGÚN MODELO MATEMÁTICO PRESENTADO.

## PROCESO DE SECADO

El proceso de secado consiste en reducir la humedad de la biomasa a una condición adecuada para su procesamiento posterior o si es la combustión lograr una mejor eficiencia, por lo que esto debe lograrse con la mayor eficiencia posible. En tanto, la operación de secado conlleva a un gasto energético, para luego tener más energía. En el secado está involucrada la humedad del material.

En el secado se involucra muchos factores, pero estos pueden agruparse en dos grandes grupos: uno relacionado a las características propias del material y otra al sistema de secado utilizado. En el primer factor las características propias de la biomasa es un factor determinante, ya que cada biomasa tiene su propia forma de secado, algunas biomásas secan más rápido que otras, mientras que otras son de más lento secado. Por ejemplo biomasa provenientes de árboles por lo general son de más lento secado que la biomasa proveniente de algunos cultivos agrícolas.

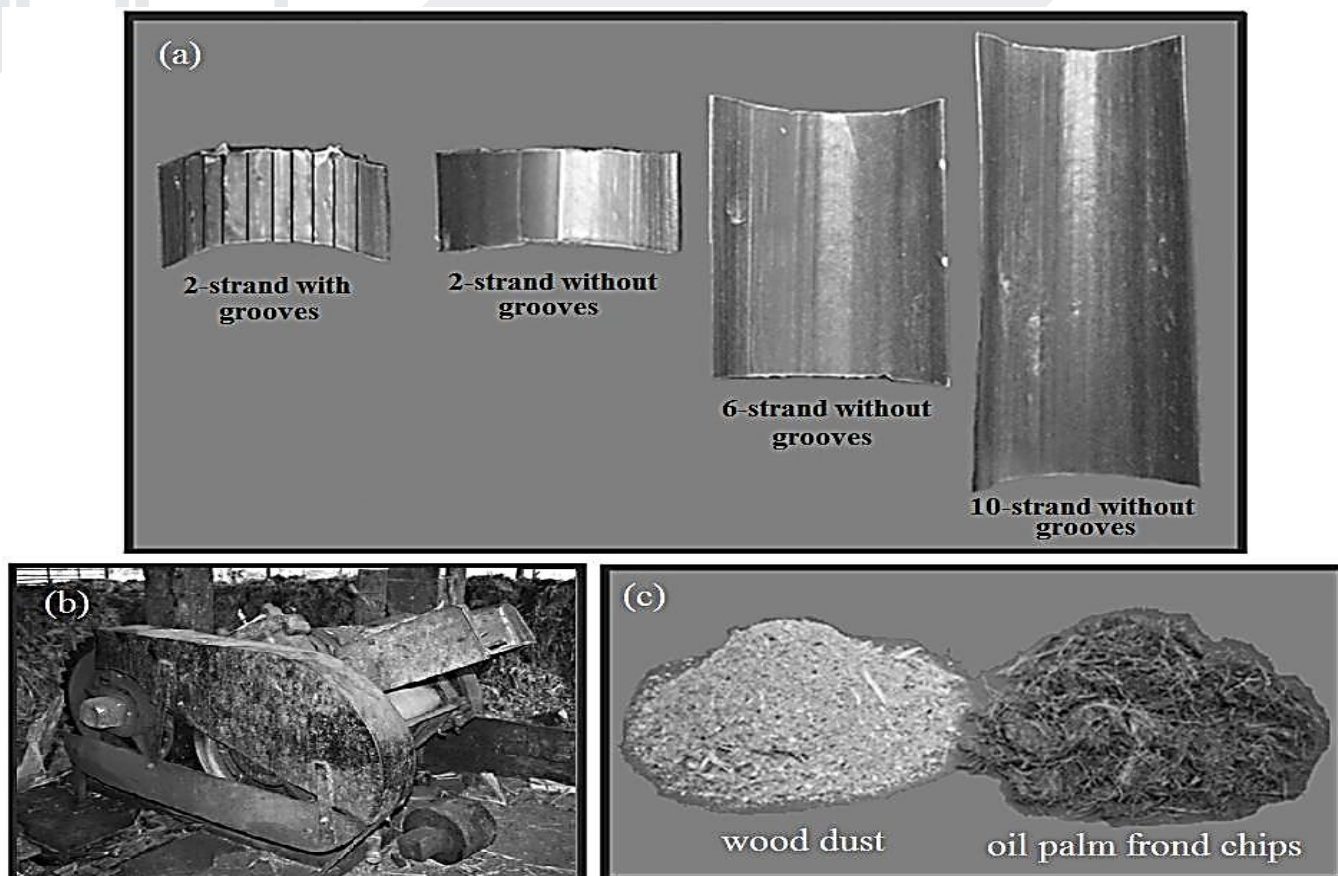
Así mismo, cada tipo de biomasa cuenta con un contenido de humedad inicial que determina la cantidad de agua que debe eliminarse durante el secado, por lo que biomasa con altos con altos grados de humedad tienden a presentar mayores tiempo de secado, por lo que hay un mayor consumo energético para secar y por el contrario, biomasa de baja humedad producen bajo consumo energético. Así por ejemplo, las biomásas provenientes de cultivos agrícolas como se ha comentado contienen mayor humedad que las especies que desarrollan algún tipo de leño como las maderas.

En el proceso de secado es importante con el fin de lograr los mejores tiempos posibles y lograr la máxima eficiencia posible, que se reduzca el tamaño de la biomasa a partículas pequeñas, por lo que hay una primera etapa por lo general llamada “reducción de tamaño”.

Por ejemplo para lograr que la madera seque más rápidamente si se quiere utilizar como biomasa y lograr la máxima eficiencia energética posible es necesario reducir los pedazos de mayor tamaño a un material particulado (Moya *et al.*, 2013). Otro ejemplo para clarificar el efecto de la forma de la biomasa sobre el efecto en el secado, es un estudio llevado a cabo por Moya *et al* (2013), dichos autores compararon el secado de aserrín de madera, el pinzote provenientes de la palma aceitera y las hojas de piña, utilizando diferentes tipos de secado: en cámara, de tipo solar y al aire libre. Fue determinado que el pinzote junto con el aserrín de madera presentó tiempo de secado muy similares entre ellos, pero la piña si no hay un tratamiento previo de reducción de tamaño el tiempo de secado es muy prolongado.

En lo relacionado a la reducción del tamaño de la biomasa, hay diferentes formas de realizarlo, la cual en adelante se retomará. Sin embargo; para cuantificar esto mostramos el ejemplo de la hoja de piña: si la mata de piña es pasada por un molino similar al que se utiliza en el procesamiento de la caña el tiempo de secado se reduce a solamente horas, a diferencia de la hoja sin ningún tipo de procesamiento que logra tiempos de secado muy prolongados. Otra forma de procesar la hoja de piña para lograr tiempos de secado menor es cortar esta largos que varían de 2 a 10 cm de largo (**Figura 10a**) o bien realizar algún tipo de estrías a las hojas para lograr exponer mejor la humedad. Este procesamiento permite:





**FIGURA 10: DIFERENTES FORMAS DE PROCESAMIENTO DE LA HOJA DE PIÑA PARA REDUCIR LOS TIEMPOS DE SECADO:**

(A) CORTAR LA HOJA EN LARGO DE 2 A 10 CM O REALIZAR ALGÚN TIPO DE ESTRÍAS.

(B) UTILIZACIÓN DEL MOLINO UTILIZADO PARA EN LA EXTRACCIÓN DEL JUGO DE CAÑA PARA PROCESAR LA MATA DE PIÑA.

(C) FORMA DE LA PARTÍCULA REDUCIDA DE PIEZAS DE MADERA Y EL PINZOTE PROVENIENTE DE LA PALMA ACEITERA.

La reducción del tamaño en el caso de la hoja de piña o bien pasar las hojas de la caña de azúcar por el molino y particular las piezas de madera y el pinzote de la palma aceitera, permite hacer determinaciones más precisas sobre el grado de humedad óptimo al cual se debe secar esta biomasa.

Por ejemplo en el caso de aserrín de madera y el pinzote de la palma aceitera, secar a contenidos de humedad inferiores al 10% produce que el consumo de energía se incremente rápidamente luego de este punto. En tanto que la hoja de piña, además de presentar mayor consumo energético en relación a los anteriores tipos de biomasa, luego del 5% de humedad el consumo incrementa rápidamente.

# INDUSTRIALIZACIÓN DE LA BIOMASA

## OBJETIVO:

Conocer los diferentes métodos de industrialización de la biomasa.

## DESARROLLO DE LA UNIDAD

### INDUSTRIALIZACIÓN DE LA BIOMASA

El proceso de industrialización de la biomasa involucra muchas etapas hasta llegar a su aprovechamiento; sin embargo, en este manual solo se explica el proceso de industrialización desde el momento de la cosecha hasta el proceso de densificación. En general la industrialización de la biomasa contempla las siguientes etapas: cosecha, recolección, transporte, reducción de tamaño, almacenamiento, secado, densificación y almacenamiento.

### UBICACIÓN DE LA BIOMASA, COSECHA Y RECOLECCIÓN

La biomasa puede proceder de diferentes partes, lo que significa que cada una de ellas tiene diferentes características que establecen ventajas y desventajas para su posterior procesamiento (**Cuadro 7**). A continuación se hace un detalle de los diferentes tipos de biomasa:

#### **DESECHOS DE PROCESOS INDUSTRIALES EN FÁBRICAS O PLANTELES INDUSTRIALES:**

Broza de café en beneficios, aserraderos, empacadores de piña, producción de masa de maíz, trapiches y procesamiento del fruto de la palma aceitera.

**RESIDUOS AGRÍCOLAS EN PLANTACIONES Y FORESTALES LUEGO DE LA EXTRACCIÓN DEL PRODUCTO PRINCIPAL:** Plantaciones forestales, cultivo de la piña, cultivo del maíz, cultivos de flores, cultivo de chile y cultivo de naranja.

**CULTIVOS ENERGÉTICOS:** Son aquellos cultivos creados exclusivamente para la producción de energía y su aprovechamiento puede ser el fruto, follaje, el fuste u otra parte importante. Los cultivos típicos son: caña, árboles a diferentes densidades de siembra, tempate, coco, jatrofa, entre otros.

**CUADRO 7: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA BIOMASA DE ACUERDO A SU LOCALIZACIÓN.**

TIPO DE BIOMASA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Desechos de procesos industriales en fábricas o planteles industriales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>·Se encuentran recolectados.</li> <li>·Fácil de transformar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>·Por lo general pertenecen a los centros de productos.</li> <li>·Tienen cierto mercado establecido.</li> <li>·Presentan fácil degradación.</li> </ul>
Residuos agrícolas y forestales luego de la extracción del producto principal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>·De gran volumen.</li> <li>·De bajo costo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>·De difícil recolección, al estar dispersos.</li> <li>·El aspecto energético debe ser analizado con cuidado. Debe reducirse para aumentar la densidad aparente.</li> <li>·Dependencia del clima y periodo corto de aprovechamiento.</li> </ul>
Cultivos energéticos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>·De gran volumen.</li> <li>·Concentrados en poca área.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>·De difícil recolección, al estar dispersos.</li> <li>·El aspecto energético debe ser analizado con cuidado.</li> <li>·Debe reducirse para aumentar la densidad aparente.</li> </ul>

Existen diferentes tipos de maquinaria que pueden ser utilizadas en la etapa de cosecha; las ideales son aquellas en las cuales una vez cosechada la biomasa inmediatamente hace la reducción del tamaño (aumentar paralelamente la densidad aparente) para depositar posteriormente a un equipo de transporte (**Figura 11**). Sin embargo, el uso de este tipo de equipos, por las condiciones de topografía y características de suelo en Costa Rica puede ser limitado.

## TRANSPORTE

En relación con el transporte, en Costa Rica esta etapa es un factor determinante para el aprovechamiento de la biomasa, ya que los costos son los que determinan la distancia a la que se debe transportar la biomasa, por ejemplo las primeras experiencias en el transporte de la biomasa han establecido que la distancia de transporte debe estar en un rango de 20-30 km del sitio donde se va procesar esta, cuando se trata de biomasa en condición húmeda.

Durante el transporte se debe buscar, con el fin de hacer la actividad más apropiada y económica, reducir el tamaño de la biomasa y que presente un bajo contenido de humedad, de esta forma se transporta una mayor densidad energética. Asimismo, se debe buscar que el método de carga y descarga de la biomasa sea realizado fácilmente y de esta manera economizar recursos. La (Figura 12) muestra algunos ejemplos de camiones utilizados en el transporte de la biomasa que facilitan la descarga de la misma.





**FIGURA 11: DIFERENTES EQUIPOS QUE PUEDEN UTILIZARSE EN LA COSECHA Y TRITURADO DE LA BIOMASA.**

## ALMACENAMIENTO

Una desventaja de la biomasa, en especial recién cortada o procesada, es que tiende a degradarse o descomponerse rápidamente, dando como resultado que no puede permanecer mucho tiempo almacenada a espera del siguiente proceso. Además de ese problema la biomasa tiende a ocupar grandes áreas, por lo que los problemas de espacio en las industrias puede ser una limitante. Además, en Costa Rica por ser una región tropical este problema se acentúa más, al presentar condiciones ideales de temperatura y precipitación para la degradación de la misma.

## SECADO

Antes de seleccionar el equipo óptimo para secar la biomasa, es importante saber ¿cuál es el volumen de biomasa que se debe secar? Un sistema ideal de secado es aquel que es realizado en minutos, por lo que probablemente involucra alta temperatura y alto consumo de energía. En el secado de biomasa es común utilizar tambores rotatorios (**Figura 13, 14**), en el cual el material pasa por la parte interna, y al final del tambor, la biomasa está seca.



**FIGURA 12: MAQUINARIA DE MEJOR USO POSIBLE UTILIZADA PARA EL TRANSPORTE DE BIOMASA.**



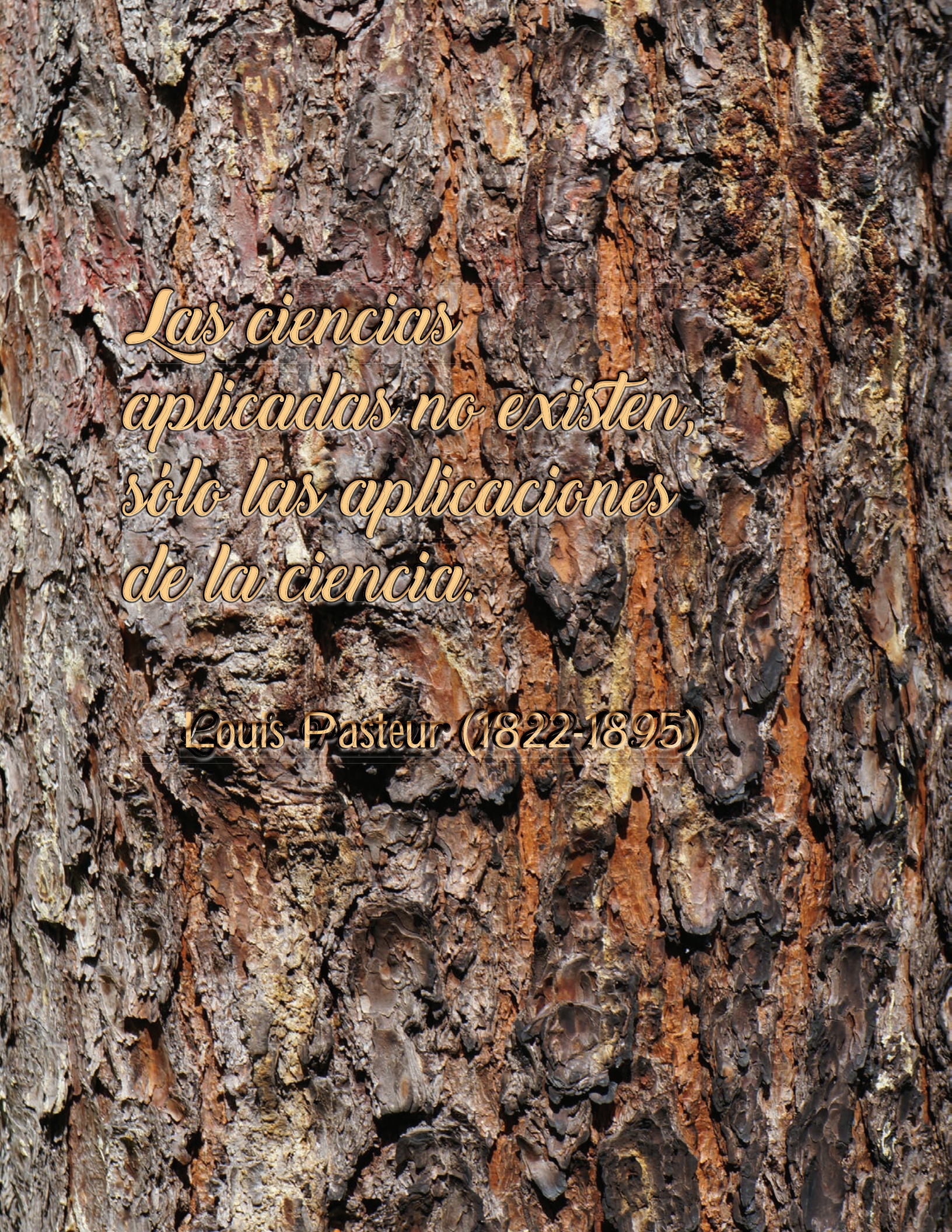
**FIGURA 13: DIFERENTES TIPOS DE TAMBORES ROTATORIOS UTILIZADOS PARA EL SECADO DE LAS PARTÍCULAS DE BIOMASA.**





**FIGURA 14:** DIFERENTES TIPOS DE TAMBORES ROTATORIOS UTILIZADOS PARA EL SECADO DE LAS PARTÍCULAS DE BIOMASA.





*Las ciencias  
aplicadas no existen,  
sólo las aplicaciones  
de la ciencia.*

*Louis Pasteur (1822-1895)*



# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Dale, V. H., Kline, K. L., Perla, D., & Lucier, A. (2013). Communicating about bioenergy sustainability. *Environmental management*, 51(2), 279-290.
- El Kasmioui, O., & Ceulemans, R. (2013). Financial analysis of the cultivation of short rotation woody crops for bioenergy in Belgium: barriers and opportunities. *BioEnergy Research*, 6(1), p.336-350.
- George, B. H., & Cowie, A. L. (2011). Bioenergy systems, soil health and climate change. In *Soil health and climate change* (pp. 369-397). Springer Berlin Heidelberg.
- Khanal, S., Surampalli, R., Zhang, T., Lamsal, B., Tyagi, R., & Kao, C. (2010). Bioenergy and biofuel from biowastes and biomass. *American Society of Civil Engineers (ASCE)*.
- Kim, H. K., Parajuli, P. B., & To, S. F. (2013). Assessing impacts of bioenergy crops and climate change on hydrometeorology in the Yazoo River Basin, Mississippi. *Agricultural and forest meteorology*, p.169, 61-73.
- Moya, R., & Tenorio, C. (2013). Fuelwood characteristics and its relation with extractives and chemical properties of ten fast-growth species in Costa Rica. *Biomass and Bioenergy*, p.56, 14-21.
- Moya, R., Tenorio, C., Bond, B. (2013). Energy balance for three lignocellulosic residues using different drying techniques. *Bioresources* 8(2): 2033-2046.
- Offermann, R., Seidenberger, T., Thrän, D., Kaltschmitt, M., Zinoviev, S., & Miertus, S. (2011). Assessment of global bioenergy potentials. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 16(1), p.103-115.
- Stoof, C. R., Richards, B. K., Woodbury, P. B., Fabio, E. S., Brumbach, A. R., Cherney, J., & Steenhuis, T. S. (2015). Untapped potential: Opportunities and challenges for sustainable bioenergy production from marginal lands in the Northeast USA. *BioEnergy Research*, 8(2), p.482-501.
- Tenorio, C., Moya, R., (2012). Evaluation of different approaches for the drying of lignocellulose residues. *Bioresources* 7(3), 3500-3514. Tenorio, C., Moya, R., Tomazello-Filho, M., & Valaert, J. (2015). Quality of pellets made from agricultural and forestry crops in Costa Rica Tropical climates. *BioResources*, 10(1), p.482-498.





Ingeniería en  
**Energías**  
Renovables