



PROGRAMA IBEROAMERICANO DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO (CYTED)



Trabajos de investigación 2019 Red IBEROMASA

OPTIMIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE BIOMASA SÓLIDA PARA USO ENERGÉTICO



Cuadernos de la
Red IBEROMASA



Optimización de los procesos de extracción de biomasa Sólida para uso energético

Trabajos de investigación 2019
Red IBEROMASA

Programa Iberoamericano de Ciencia y
Tecnología para el Desarrollo (CYTED)



Cuadernos de la **RED IBEROMASA**

Editor

Universitat Politècnica de València

Coordinador

Borja Velázquez Martí

© de los textos y las imágenes: sus autores

Diseño y maquetación

Enrique Mateo, Triskelion Diseño Editorial

Imprime

Byprint Percom SL .

ISBN: 978-84-121798-5-9

Depósito Legal: V-1497-2020

Los editores autorizan la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a los editores, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos, deberá solicitarse por escrito.

Impreso en España

Contenido

Prólogo	vii
---------------	-----

PARTE A: Cultivos energéticos y otras fuentes de materia prima

Eucalipto en Ecuador	3
Velázquez-Martí, B., Gaibor-Chavez, J.	
Generalidades cultivo eucalipto en Uruguay.....	15
Resquin, F., Carrasco-Letelier, L., Rachid-Casnatti, C., Navarro-Cerrillo, R.	
Producción de biomasa del fuste de <i>Eucalyptus benthamii</i> Maiden & Cambage, <i>Eucalyptus dunnii</i> Maiden y <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden en plantaciones de corta rotación en Uruguay	29
Resquin, F., Carrasco-Letelier, L., Rachid-Casnatti, C., Navarro-Cerrillo, R.	
Bambú en Perú	63
Césare, M.F., Titto, J.L., Paucar, R., Calle, J.L., Gonzales Mora, H.	
Caña de azúcar en Paraguay.....	89
Lovera-Rivas, L., Ramirez-Mereles, H.A.	
Producción forestal en la Mesopotamia Argentina: situación actual y potencialidades en el uso de la madera como fuente energética	105
Sabattini, J.A., Dalla Costa, B., Francia, D., Beti Dallava, A.	
Caña de azúcar en Argentina: situación actual y uso para fines bioenergéticos.....	145
García, J.M., Molina, C., Acevedo, A.	
Biomassa de vegetais não lenhosos e resíduos orgânicos para geração de energia no Brasil e estado de São Paulo	159
Bonini, C.S.B., Alves, M.C., Crestana, S., Moreira, B.R.A., Lozano Oliverio, G., Ferreira Rodrigues, R.A.	
Maíz en Cuba	197
Ramírez-Olivera, R., Núñez-Tablada, R., Villazón Gómez, J.A., López Cruz, V., García Reyes, R.A.	
Caña de azúcar en Cuba	205
Villazón Gómez, J.A., Núñez Tablada, R.C., García Reyes, R.A., Ramírez Olivera, R., López Cruz, V.A.	
Marabú en Cuba	215
Núñez Tablada, R.C., Ramírez Olivera, R., Gracia, R., Villazón Gómez, J.A., López Cruz, V.A.	
Residuos del Arroz en Cuba	221
García-Reyes, R.A., Núñez Tablada, R.C., Villazón Gómez, J.A., Ramírez Olivera, R.	

Girasol en Venezuela.....	231
Camacho-Marín, R.	
Evaluación financiera del uso de bagazo para la generación de electricidad en Nicaragua.....	245
Blanco, N.	
<i>Jatropha curcas</i> en Ecuador.....	255
Acosta-Chapi, J., Franco-Rodríguez, J., Kuffó-García, A., Peñalver-Romeo, A., Riofrío-Figueroa, M., Mena Campoverde, C., Velázquez-Martí, B.	
PARTE B: Mejora de procesos de aprovechamiento energético de biomasa	
Ethanol from green coconut fiber using alkaline combined steam explosion pretreatment.....	267
Troccoli Ribeiro, V., Araújo da Costa, W., Castro Campolina, A., Silvino dos Santos, E.	
Modelo de uso de biomasa para la generación de electricidad.....	279
Blanco, N.	
Pirólisis de residuos del fruto de aguaje (<i>Mauritia Flexuosa</i> L.F) y aserrín maderas de baja densidad para La obtención de carbón.....	285
Guerrero Córdova, A.S., Guerrero Vejarano, T.E.	
PARTE C: Caracterización de materias primas	
Solid biofuels characterization in Portugal.....	301
Cancela, E., Almeida, T., Alves, N., Figo, S.	
Evaluación preliminar de la calidad de astilla de madera como base para una estandarización de biocombustibles sólidos en México.....	311
Carrillo Ávila, N., Cano, M.E., Pérez Martínez, A., Carrillo Parra, A., Rutiaga, J.G.	
Caracterización Mofológica del Fruto de Mamey (<i>Mammea americana</i> L.).....	315
Zarraga Bello, A.R., Camacho Marín, R.A., Merino Cordova, P.A., Loor Reasco, W.A.	
PARTE D: Resúmenes encuentro de investigadores Guayaquil 2019	
Resumen ponencia: Caracterización de residuos maderables.....	327
Rutiaga Quiñones, J.G.	
Resumen ponencia: Plataforma Web Geoespacial para estimación de oferta y demanda de biomasa.....	329
Tauro, R., Rangel, R., Suárez, R., Caballero, J.L., Salinas, M., Ghilardi, A.	
Investigación e Innovación en Biocombustibles Sólidos para la transición energética de México.....	331
Cohen Salgado, D., Masera Cerutti, O.	

Prólogo

IBEROMASA es una red auspiciada por Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) que involucra a académicos, investigadores, empresas y representantes de las administraciones públicas que estudian el posible uso de la biomasa generada en el medio agroforestal como fuente de energía en Latinoamérica, con el objetivo de orientar mejor las políticas de promoción del uso de este recurso como herramienta de desarrollo dentro de una gestión sostenible. La acción presentada en IBEROMASA tiene por objetivo general desarrollar, mejorar y/o adaptar tecnologías para la utilización eficiente de combustibles biomásicos sólidos para usos térmicos, tanto a nivel doméstico como en pequeñas industrias en zonas rurales y urbanas marginales, que sean viables técnica, económica y socialmente, replicables y que contribuyan de forma directa al desarrollo sostenible, la equidad de género y la protección del medio ambiente de la Región Iberoamericana.

La necesidad de sustituir el petróleo y el carbón por fuentes de energía inagotables y más limpias ha propiciado la búsqueda alternativas basadas en la transformación de biomasa para producir biocombustibles (astillas, pélets, biodiesel o bioetanol). La red IBEROMASA pretende generar conocimiento sobre las condiciones de producción, rendimientos, costes y rentabilidad de plantaciones energéticas para la obtención de biocombustibles sólidos destinados a paliar la dependencia de combustibles fósiles en el sector industrial.

Esta obra se centra en los cuatro ámbitos en los que trabaja la red:

1. Elaboración de una guía de cultivos energéticos para biomasa sólida susceptibles de implantarse en cada país de Latinoamérica.
2. Unificar de los criterios de cuantificación de materia prima e inventariación de recursos. Aquí entra la aplicación de dendrometría clásica, dasometría tanto forestal como adaptada al medio agrícola, también la aplicación de nuevas tecnologías como SIG, Teledetección, Lidar.
3. Desarrollar y divulgar una metodología de evaluación financiera para proyectos de implantación de cultivos energéticos y proyectos de aprovechamiento de residuos agrícolas, forestales o agroforestales.
4. Abordar los criterios de caracterización y análisis de biomasa para evaluar su aptitud para su utilización como materia prima para la fabricación de biocombustibles sólidos.

A razón de estos aspectos se han clasificado los trabajos desarrollados en 2019 en distintos apartados. En publicaciones sucesivas realizaremos una recopilación de los mismos sacando un monográfico para cada uno de los temas.

Mediante estos trabajos de investigación se pretenden obtener parámetros de predicción de la biomasa potencial que se puede extraer de los sistemas agrícolas latinoamericanos. Posteriormente estos parámetros pueden ser aplicados a los inventarios agrícolas o sistemas de información geográfica de forma que permita, gestionar o hacer políticas de promoción de uso de esta biomasa.

Se busca obtener conocimientos sobre la tecnología apropiada para extraer y transformar los recursos energéticos de los sistemas agrícolas, también sobre las carencias o necesidades de infraestructuras para realizar estas operaciones, así como establecer los análisis económicos propios para valorar su pertinencia.

Espero que los esfuerzos realizados sean incentivos para trabajos futuros e impulso para el emprendimiento empresarial y desarrollo económico. Quiero agradecer a los investigadores de la red por los esfuerzos realizados en esta obra. Todos ellos ilusionados en poder sacar los mejores resultados para una sociedad que precisa soluciones factibles en el ámbito energético, y con un gran potencial de desarrollo. Fruto de ese empeño es la propia red y esta obra. Me es muy grato que ellos sean catalizadores del avance a una sociedad con un mayor desarrollo económico, mejor gestión del territorio y de los recursos, y contribuyan a mejorar la calidad de vida.

Borja Velázquez-Martí
Coordinador de la red IBEROMASA

Catedrático de Universidad
Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria.
Universitat Politècnica de València.
Camino de Vera s/n, 46022 Valencia (España)

Cuadernos de la Red IBEROMASA

Optimización de los procesos de extracción de biomasa sólida para uso energético

PARTE A

Cultivos energéticos y otras fuentes de materia prima

Eucalipto en Ecuador

Borja Velázquez-Martí¹*, Juan Gaibor-Chavez²

¹Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria. Universitat Politècnica de Valencia. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia (Spain)

²Centro de Investigación de Ambiente, Departamento de Investigación, Universidad Estatal de Bolívar, Lagucoto II, km 1y 1/2 vía San Simón, Guaranda, Ecuador

*Autor para correspondencia: borvemar@dmta.upv.es

1. Descripción

Características generales

Los eucaliptos son árboles perennes de la familia de las mirtáceas. Tienen un porte recto y alto, llegando a alcanzar entre 50 y 60 m en estado de madurez. Estos árboles se caracterizan por corteza lisa y verdosa blanquecina, que en constante renovación, libera escamas que provocan manchas grises o parduscas sobre el tronco. Las hojas son lanceoladas u ovaladas de color grisáceo.



Figura 1. Plantación de Eucaliptos.



Figura 2. Corteza del Eucalipto.

En realidad, existen muchas especies distintas de eucaliptos. Cada especie está adaptada a ciertos condicionantes climáticos. Por lo general, están adaptados a climas templados o cálidos suaves. Las especies más comunes son *Eucalyptus coccifera*, *Eucalyptus subcrenulata*, y *Eucalyptus gunnii*. Particularmente las subespecies, *Eucalyptus pauciflora* subsp. *niphophila* y *Eucalyptus pauciflora* subsp. *debeuzevillei* son las más resistentes al frío y pueden tolerar inviernos muy severos. Crecen con bastante rapidez.

Sistema radicular

El eucalipto tiene un potente desarrollo del sistema radicular que precisa profundidad del suelo debido a que la compresión de sus raíces dificulta el crecimiento. La raíz es pivote estructurada en un eje vertical primario rodeado de raíces secundarias.

Tallo

Los tallos son erectos, con corteza de color verdoso blanquecino o grisáceo azulado.

Hojas

Las hojas del eucalipto son grisáceas. La forma más común es alargada lanceoladas, aunque hay especies de hojas ovaladas. Comienzan siendo sésiles, es decir, están asidas al tallo sin peciolo. Posteriormente, el peciolo se alarga y adquieren un color verde azulado brillante con el nervio central muy marcado. Están dispuestas de forma alternada.

Flores

Las flores se caracterizan por poseer numerosos estambres sin pétalos. Pueden estar agrupadas en umbelas, inflorescencias abiertas, racimosas en la que del pedúnculo se irradian los pedicelos florales, varillas de igual longitud.



Figura 3. Hojas lanceoladas de Eucalipto



Figura 3. Racimos florales de Eucalipto con flores en botón y flores abiertas.

Frutos

Los frutos tienen forma de cápsula de unos 2.5 cm de longitud dividida en tres o cuatro sectores con un gran número de semillas negras de 1 o 2 mm.

2. Distribución

El eucalipto es un árbol originario de Australia, pero que se ha distribuido por todas las zonas templadas o cálidas suaves alrededor del mundo. En la actualidad pueden encontrarse en áreas de alrededor del Mediterráneo, norteamérica y Latinoamérica. También se distribuye por sur de Asia, desde la India hasta China.

3. Exigencias del cultivo

Temperatura mínima y máxima, rango óptimo

El eucalipto crece adecuadamente en climas cálidos o tropicales. Requiere ambientes soleados. La temperatura óptima de desarrollo se sitúa entre 20 °C y 30 °C. Sin embargo, tiene una cierta resistencia al frío, La mayoría de especies pueden resistir temperaturas de hasta -12 °C, pudiendo desarrollarse a temperaturas de -5 °C.

Hay que señalar que la variedad de mayor resistencia es el eucalipto de nieve (*Eucalyptus pauciflora*) que puede resistir hasta -20 °C.

Fotoperiodo

El eucalipto precisa de entre 6 y 8 horas a la luz solar directa. No son adecuado zonas umbrías.

Necesidades de agua

Para una condiciones ideales de crecimiento se precisa una disponibilidad entre unos 700 y 1000 mm anuales de pluviosidad, aunque algunas especies de eucaliptos se encuentran adaptados a las condiciones áridas extremas, pudiendo soportar lluvias inferiores a los 300 mm anuales, por ejemplo el *Eucalyptus salmonophlola* es una especie utilizada en el norte de África por su resisa.

En general, la disponibilidad de agua debe ser uniforme durante el año, por lo que son preferibles los terrenos que mantengan un poco la humedad. No toleran bien los periodos prolongados de sequía. El déficit de agua se manifiesta produciéndose marchitez en las hojas. En ese momento el restablecimiento de agua abundante no provoca que las hojas afectadas se recuperen.

Necesidades nutricionales

Sólo será necesario realizar abonado los primeros años de la plantación.

Exigencias de suelo

El eucalipto se puede cultivar en cualquier tipo de textura, tanto arcillosa, limosa como arenosa. El factor más importante para el adecuado desarrollo es el pH, debiendo estar comprendido entre 5.5 y 6.5.

4. Estadios fenológicos

Tabla 1. Épocas de los distintos estadios.

Germinación	Primavera
Floración	Entre la primavera y el verano
Plantación	Primavera
Fructificación y cuajado	Verano
Dehiscencia de frutos	Otoño

5. Principales enfermedades y plagas

En general el eucalipto es una especie que no presenta plagas y enfermedades graves, por lo que no es habitual someterla a tratamientos fitosanitarios específicos. Además cuando se ve gravemente afectada éstos resultan difíciles y caros, por lo que se opta por la eliminación de los árboles afectados.

Insectos

Hormigas: Las hormigas representan el mayor peligro para las plantaciones y viveros. Dado que lesionan las hojas y las yemas, causando la muerte de la planta. Esto exige una continua inspección durante el primer y segundo año siguientes a la plantación.

Se considera que la presencia de 50 hormigueros por hectárea justifica el coste de las operaciones de destrucción de los mismos como operación preventiva antes de la plantación. La destrucción de los hormigueros se puede realizar mediante el uso de insecticidas en forma líquida o gaseosa aplicado mediante medios neumáticos. El objetivo principal será destruir la reina. Los productos usados son el dióxido de azufre sólo o mezclado con arsénico, y el disulfuro de carbono en dosis de 60 a 200 cm³ por hormiguero, según el tamaño de éste.

Gorgojo Gonipterus scutellatus: Este uno de los insectos que hasta ahora ha causado mayores daños a las plantaciones de eucaliptos. Su presencia se ha observado en Nueva Zelanda, y sur de África. Ataca con preferencia *Eucalyptus maideni*, *E. viminalis*, *E. globulus*, *E. camaldulensis*, *E. robusta*, *E. citriodora* y *E. smithii*. En cambio otras especies como *E. saligna*, *E. cladocalyx*, *E. melliodora*, *E. crebra*, *E. fastigata*, *E. paniculata* y *E. maculata* parecen ser resistentes. Existe una considerable literatura sobre los métodos de combatir este insecto. Cabe destacar que puede ser controlado biológicamente con el himenóptero, *Anaphoides nitens*, el cual es de dispersión rápida.

Ericoccus coriaceus: Este insecto coccidio se coloca sobre las ramas y sobre las nerviaciones principales de las hojas. Segrega un líquido en el que se desarrolla un hongo de color negro característico. Sin embargo, hoy esta plaga puede controlarse fácilmente mediante

lucha biológica mediante el coccinélido *Rhizobius ventralis*, la mosca *Pseudoleucopis benefica* y el lepidóptero *Stathmopoda melanchra*.

Phoracantha semipunctata y *Paramallocera ilinizae*: Estos son coleópteros cerambícidos cuya larva abre una galería en la madera y destruye el cámbium, ocasionando la muerte del árbol. Afecta principalmente a árboles jóvenes de 15 a 20 cm de diámetro en lugares poco favorables o en mal estado. Puede propagarse sobre árboles ya apeados en descomposición.

Afecta principalmente al *Eucalyptus globulus*, *E. botrioide*, *E. camaldulensis*, *E. diversicolor*, *E. saligna*, y *E. viminalis*. Sin embargo especies como *E. paniculata*, *E. fastigata* ni *E. cladocalyx. s.*, *E. camaldulensis*, *E. citriodora* no se ven afectadas.

Otros insectos: pueden mencionarse los lepidópteros *Thyrinteina arnobia* y *Phassus giganteus*, que abren galerías en los puntos de contacto entre bejucos y árboles.

Hongos

El periodo de germinación y primer desarrollo es el más sensible a los hongos. En Sudamérica es destacable *Eucalyptus citriodora* que provoca la pudrición del cuello; y un tumor del tronco de las plantas jóvenes, ocasionado por una especie de *Cylindrocladium*, y *Ganoderma sessile*, que ataca a los árboles dañados.

Botrytis cinerea. Sin embargo, este hongo no es de gran importancia económica. Ataca las semillas en los viveros, o los árboles muy jóvenes que no se encuentran en buenas condiciones.

Stereum hirsutum que ataca sobre los brotes de raíz del *E. globulus*, *E. diversicolor* y *E. saligna*, provocando la posterior pudrición del corazón, principalmente en árboles maduros o viejos con más de 40 años.

6. Técnicas de cultivo

Utilizado en masas forestales de alta densidad, aprovechadas a turnos cortos (3-5 años) las producciones se pueden situar entre 16 y 21 t/ha de materia seca. El crecimiento medio en altura es de 4 m al año y en diámetro de 4 cm (Carrero et al., 2018).

El cultivo no requiere excesivas tareas de manejo selvicultural. La principal es la realización de limpiezas los dos primeros años, y después del aprovechamiento el manejo de rebrotes (du Toit, 2008).

Tecnología de preparación del suelo

Previamente a la plantación habrá que hacer un desbroce de la parcela, bien de forma mecanizada con desbrozadora de cadenas, bien con un herbicida de amplio espectro.

De existir riesgo de encharcamiento, se tendrá que hacer un drenaje mediante la apertura de zanjas que desvíen el agua.

El último paso de preparación del terreno será la realización de agujeros bien de forma manual o con una retro equipada con un cazo de 60 centímetros. Otra alternativa es el subsolado con un ripper en la línea de plantación. En pendiente es recomendable seguir curvas de nivel.

Marco de plantación

El marco de plantación aconsejado es de 3x3 metros (1.111 plantas por hectárea) o 3x4 metros (833 plantas por hectárea). En cuanto a la época de plantación, se recomienda la primavera.

Tecnología de fertilización

Sólo será necesario realizar abonado los primeros años de crecimiento.

En el momento de la plantación se suelen suministrar 40 gramos de fertilizante compuesto NPK 8-28-7 con boro y magnesio en el pozo de plantación. El alto contenido en fósforo y boro estimula el desarrollo de las raíces y reduce la bifurcación del tronco.

Para el segundo año, es recomendable hacer un desbroce del matorral que reduzca la competencia por nutrientes y agua. Es por ello que en algunas ocasiones se realiza un nuevo abonado, dado que mejora la velocidad de crecimiento. Esta operación se realizaría durante las temporadas de crecimiento, es decir, entre la mitad de la primavera y la mitad del verano. Los mejores fertilizantes son los ricos en fósforo y bajos en nitrógeno. En muchas plantaciones prescinden de este segundo abonado.

La fertilización puede realizarse de forma manual a voleo o mediante el empleo de abonadoras centrífugas sobretodo en plantaciones con mas de 4 m de separación entre hileras.

Tecnología de propagación y plantación

La propagación del eucalipto suele realizarse generalmente a través de sus semillas, debido a que hacerlo a partir de sus esquejes es difícil, y posee una menor probabilidad de éxito. Las cápsulas que posee las semillas se recolectan del suelo en el otoño, asegurándose que están todavía cerradas. Posteriormente se dejan secar en lugar soleado para que se abran. Entonces se extraen las semillas de 1 o 2 mm. Cada capsula posee gran número de semillas.

Para germinar el eucalipto a partir de su semilla, éstas requieren un cierto número de horas frío. Por ello, para facilitar su germinación, las semillas envasadas se enfrían en frigorífico a 5 °C durante dos meses. Este proceso se llama estratificación. La estratificación reproduce el periodo de inactividad que tiene lugar durante el invierno, de forma que se favorece la activación del metabolismo de inicio de la germinación una vez aumenta la temperatura.

Tras esta fase, unas cuantas semillas de eucalipto se colocan en macetas de turba con perlita al final del invierno (en el hemisferio norte a mediados de febrero, en el hemisferio sur a mediados de julio). El eucalipto es sensible al trasplante. Por ello el uso de turba reducirá el estrés de este proceso dado que ofrece baja resistencia a la manipulación de la posterior plántula. Además garantiza el buen drenaje, evitando diferentes afecciones asociadas a la asfixia radicular y encharcamiento. Las semillas deben quedar cubiertas bajo la superficie aproximadamente a una profundidad de 1 cm.

Las macetas pueden estar a la intemperie varias semanas, teniendo en cuenta la ausencia de heladas.

Las semillas en las macetas deben ser humedecidas regularmente bien con agua pulverizada o por sistema de goteo, especialmente cuando las semillas empiecen a germinar,

siendo conveniente hacerlo a diario o en días alternos para mantener el medio de cultivo uniformemente hidratado.

La germinación y desarrollo de la plántula se ve favorecida con el aumento de la temperatura. Por ello esta fase debe realizarse en primavera o en invernadero.

Dado que se plantan varias semillas por maceta, es posible que brote más de un vástago. Entonces se cortan los vástagos más débiles con tijera de poda a nivel de la tierra, dejando uno sólo por maceta, el más grande, grueso y sano.

El trasplante a parcela se realiza tras 5 o 6 meses (a mitad del verano). Este se realiza en los agujeros realizados manualmente o con una retro equipada con un cazo de 60 centímetros. Cada hoyo se rellena con tierra y compost maduro rodeando el cepellón que surgió de quitar la maceta o envase donde se desarrolló el sistema radicular de la plántula. Posteriormente se compacta suavemente la tierra alrededor de las raíces. Se riega la zona con agua abundante para ayudar a que los eucaliptos se asienten en la tierra

Tras la plantación es conveniente mantener la tierra húmeda, pudiendo realizarse algún riego de refuerzo. Los eucaliptos toleran la sequía hasta cierto punto, pero responden mucho mejor a la tierra constantemente húmeda.

Sistema de riego

En plantaciones muy tecnificadas en zonas de pluviometría irregular, durante el primer año se realizan riegos de refuerzo. Éste se puede realizar por goteo, aspersión o mediante cuba.

Una vez que el árbol se haya establecido, no se realizan riegos ni aplicaciones de fertilizantes, ni siquiera durante los periodos de sequía.

Poda

Las plantaciones de eucalipto son susceptible de realizarles podas de formación durante el primer y segundo año. No obstante, éstas pueden ser prescindibles si el destino de la madera es energético. Sin embargo cuando el destino es industrial las podas se repiten al tercer y cuarto año, y además se realizan clareos a partir del segundo año, eliminando el 50%, las plantas poco erectas o con deformaciones, con el objetivo que el resto crezcan con mayor velocidad y calidad.

Tras el primer año de crecimiento desde el trasplante, en el momento que la planta ha alcanzado unos 4 m, se eliminan las ramas más bajas, como orientación aquellas a una altura más baja de la que el tronco tenga un diámetro superior a 4 cm. Estas ramas suelen ser finas y se cortan con tijera de poda a ras del tronco, intentando no dejar abultamiento.

La segunda poda se realiza en el tramo del tronco entre 4 y 6 cm, o donde alcance la altura del podador. Esta operación también puede realizarse con tijera. Podas posteriores, si fueran necesarias, se realiza con serrucho acoplado a una pértiga, eliminando las ramas más bajas hasta 5-6 m, realizando el corte al ras.

Tecnología de cosecha

En plantaciones energéticas el turno de corte se suelen fijar en 3 años. En plantaciones para obtención de madera se prolonga hasta los 6 o 7 años.

La cosecha comprende un conjunto de operaciones: corte o apero del árbol, extracción de la parcela, astillado y transporte.

Tala

El corte o apero del árbol se puede hacer por varias opciones. Las principales son la tala tradicional mediante motosierra, o la utilización de taladora apiladora (Feller buncher).

Las taladoras apiladoras son máquinas autopropulsadas que poseen un brazo articulado con un cabezal dotado de dos grapas que cogen fuertemente el árbol, mientras por la parte inferior del mismo un dispositivo de corte lo tala. Una vez el árbol está cortado la pluma lo deja apilado en una zona próxima al apeo y vuelve a dirigirse a otro árbol, para repetir el ciclo (Velázquez-Martí, 2017).

El dispositivo de corte del que va dotado el cabezal puede ser una motosierra oscilante, un disco de corte o una cuchilla afilada que corta el tronco por cizalla. El brazo articulado y la pluma con el cabezal puede apea árboles separados de la máquina hasta una distancia de 7-8 metros.

Estas máquinas pueden poseer tren de rodaje de cadenas o por neumáticos. Sobre el bastidor va montada la cabina de mando que posee capacidad de movimiento giratorio de 360°. Estas máquinas presentan transmisión hidrostática tanto para el tren de rodaje como para el accionamiento de los elementos de trabajo.

Desembosque

La extracción de las piezas apeadas hasta el área de acopio se puede hacer por arrastre a través de un tractor arrastrador (*skidder*) o mediante un tractor autocargador (*forwarder*). Esta segunda opción es más habitual.

Astillado y transporte

El astillado se realiza en el área de acopio o cargadero. Se suele utilizar una astilladora transportable. Es decir, una astilladora montada sobre un camión que trabaja sin desplazarse en la pista forestal en el área de acopio.

Estas astilladoras poseen un deflector emisor de la astilla, que la conduce directamente a un contenedor de transporte.

Los contenedores de transporte pueden estar montados sobre el chasis de los camiones, o ser traccionados por tractores o trailers.

7. Estudio económico

Para el análisis económico se considerará que se adquieren los plantones ya formados de unos 15 a 30 cm altura, procedentes de viveros especializados en la propagación de esta planta. En el análisis realizado en Ecuador se tomarán los siguientes costes unitarios (Tabla 2).

Tabla 2. Precios unitarios del estudio económico.

Materias primas	
Plantones	0.5 \$/unidad
NPK 8-28-7 con boro y magnesio	0.45 \$/kg
Maquinaria	
Retroexcavadora	40.20 \$/h
Taladora apiladora	50.10 \$/h
Tractor autocargador	35.48 \$/h
Astilladora transportable	75.95 \$/h
Contenedor de transporte	\$/h
Mano de obra	
Jornal	10 \$/h

Precio de mercado

El precio de mercado se ha obtenido de Argus Media (2019), que indica que el precio de astilla en Brasil es de 129.5 \$/t.

Contabilización de costes

Se considera una plantación de 3 x 4 m, es decir, 833 plantas por hectárea.

Tabla 3. Costes de plantación.

Concepto	Unidad	Medición	Coste unitario	Coste
Abertura de pozos	h/ha	0.45	40.20	18.09
NPK 8-28-7 con boro y magnesio	kg/ha	33.32	0.45	14.99
Plántulas	ud/kg	833	0.50	416.5

Tabla 4. Costes de poda.

Concepto	Unidad	Medición	Coste unitario	Coste
Primera poda	h/ha	15	10	150
Segunda poda	h/ha	15	10	150

Para el cálculo de los costes de cosecha se ha considerado una productividad de la taladora apiladora de 45 t/h (Ghaffariyan y Brown, 2011), una productividad del tractor

autocargador de 4 t/h (Cremer y Velázquez-Martí, 2007), una productividad de 40 t/h en la astilladora (Ghaffariyan y Brown, 2011).

Tabla 5. Costes de cosecha.

Concepto	Unidad	Medición	Coste unitario	Coste
Taladora apiladora	h/ha	0.45	50.10	22.55
Tractor autocargador	h/ha	5	35.48	177.40
Astillado	h/ha	0.5	79.85	40.00
Transporte	h/ha			

Tabla 6. Resumen de costes.

Concepto	Medición	Unidad
Plantación	449.58	\$/ha
Poda	300	\$/ha
Cosecha y transporte	239.87	\$/ha

El coste total de la plantación se estima en 989.45 \$/ha. El ingreso se estima en 129.5 \$/t, que equivale a 2590 \$/ha. Por tanto el flujo de caja a los tres años, que es cuando se considera el turno, es de 1600.5 \$/ha, 80 \$/t.

8. Características energéticas de la madera

La madera del eucalipto posee las siguientes características.

Tabla 7. Características energéticas del eucalipto.

Poder calorífico	18.9 ± 0.5 MJ/kg	(Gominho et al., 2012)
Densidad a granel con P15	1.78 t/m ³	(Kumar et al., 2011)
Porcentaje de cenizas	0.6 ± 0.2 %	(Gominho et al., 2012)
Porcentaje de Volátiles	81.1 ± 0.6 %	(Gominho et al., 2012)
Porcentaje de carbono fijo	18.3 ± 0.6 %	(Gominho et al., 2012)
Contenido en C	46.8 ± 0.6 %	(Kumar et al., 2011)
Contenido de H	5.8 ± 0.1 %	(Gominho et al., 2012)
Contenido en N	0.16 ± 0.05 %	(Kumar et al., 2011)
Contenido en S	0.18 ± 0.06 %	
Contenido en Cl	0.04 ± 0.01 %	(Gominho et al., 2012)
Punto de fusibilidad de cenizas	°C	

9. Conclusiones

En las plantaciones energéticas de eucalipto se pueden obtener producciones entre 16 y 21 t/ha de materia seca. El precio de mercado se sitúa alrededor de 129.5 \$/t. El coste de la producción se sitúa en 989.45 \$/ha, obteniendo un beneficio de 80 \$/t o 1600.5 \$/ha. La energía obtenible en las plantaciones equivale a 378 GJ/ha.

Referencias

- Argus Media. (2019). Bioenergía. Recuperado de <https://www.argusmedia.com/es/bioenergy>
- Carrero, O., Stape, J. L., Allen, L., Arrebillaga, M. C., Ladeira, M. (2018). Productivity gains from weed control and fertilization of short-rotation Eucalyptus plantations in the Venezuelan Western Llanos. *Forest Ecology and Management*, 430, 566–575. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.050>
- Cremer T., Velázquez-Martí B. (2007). Evaluation of two harvesting systems for the supply chips in Norway spruce forest affected by bark beetles. *Croatian Journal of Forest Engineering* 28(2): 145-155. <https://hrcak.srce.hr/18249>
- du Toit, B. (2008). Effects of site management on growth, biomass partitioning and light use efficiency in a young stand of Eucalyptus grandis in South Africa. *Forest Ecology and Management*, 255(7), 2324–2336. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.037>
- Ghaffariyan, M., Brown, M. (2011). Efficiency of Biomass Harvesting in Poor Quality Stands of Eucalyptus in Western Australia. *34th Council on Forest Engineering*, June 12-15, 2011, Quebec City (Quebec).
- Gominho, J., Lourenço, A., Miranda, I., Pereira, H. (2012). Chemical and fuel properties of stumps biomass from *Eucalyptus globulus* plantations. *Industrial Crops and Products*, 39, 12–16. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.01.026>
- Kumar, R., Pandey, K. K., Chandrashekar, N., Mohan, S. (2011). Study of age and height wise variability on calorific value and other fuel properties of Eucalyptus hybrid, *Acacia auriculaeformis* and *Casuarina equisetifolia*. *Biomass and Bioenergy*, 35(3), 1339–1344. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.031>
- Velázquez-Martí, B. (2017) *Aprovechamiento de la biomasa para uso energético*. Ed. Reverté, 840 pp.

Generalidades cultivo eucalipto en Uruguay

**Fernando Resquin^{1*}, Leonidas Carrasco-Letelier²,
Cecilia Rachid-Casnatti¹, Rafael Navarro-Cerrillo³**

¹Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Programa Nacional de Investigación en Producción Forestal, Estación Experimental del Norte, INIA Tacuarembó, Ruta 5 km 386, Tacuarembó, Uruguay.

²Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Programa de Producción y Sustentabilidad Ambiental, Estación Experimental INIA La Estanzuela Alberto Boerger, Ruta 50 km 11, 39173, Colonia, Uruguay.

³Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes (ETSIAM), Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Carretera Nacional IV, km 396, Córdoba, España.

*Autor para correspondencia: fresquin@inia.org.uy

1. Potencial de producción de biomasa con especies forestales

La producción de biomasa tiene la particularidad de integrar al sector forestal, como generador de materias primas, y al sector industrial, como transformador de las mismas en distintos tipos de energía (electricidad y calor o ambas al mismo tiempo). Por otro lado, tiene la ventaja de que la biomasa puede ser transformada en varios tipos de combustibles (líquidos, sólidos y gaseosos), lo que permite cierta flexibilidad al momento de optar por alguna alternativa que se adapte a las condiciones y/o situaciones particulares del momento (Zsuffa et al., 1992; Carrillo, 2004). Otras particularidades de este tipo de plantaciones es que no compiten por tierras de interés agrícola y al mismo tiempo aseguran un secuestro neto de carbono muy superior a otros cultivos agrícolas a través de la biomasa total (parte aérea más raíces enterradas) (Sims et al., 2006).

Debido al surgimiento de otras fuentes de energía eléctrica como la eólica y la fotovoltaica, la generación a partir de biomasa forestal en algunos países está siendo menos atractiva básicamente por una razón de costos. De todas maneras, la generación de energía a partir de biomasa tiene algunas ventajas comparativas con respecto a las mencionadas, como es el impacto positivo en la generación de puestos directos e indirectos de trabajo producidos por la instalación de este tipo de plantas en el interior del país. Por otro lado, existe un creciente interés en la exploración de alternativas de producción de combustibles líquidos o gaseosos a partir de distintos tipos de biomasa como los residuos forestales de campo, cultivos energéticos forestales de corta rotación, cultivos intensivos agrícolas, etc.

La información que surge en los últimos años muestra que existen una serie de procesos denominados por su sigla en inglés BTL (biomasa a Líquido) o BTG (biomasa a gas) que podrían llegar a ser usados a nivel comercial en los próximos años (Swain et al., 2011; Sunde et al., 2011).

Estos proyectos han tenido como objetivo la transformación de madera en gases combustibles, e incluso en productos químicos de mayor valor ("Gas de Síntesis" o hidrógeno), recurriendo para ello a su descomposición térmica en atmósfera pobre en oxígeno (pirólisis y gasificación). La gasificación da lugar a una mezcla de gases de considerable poder calorífico. También dicha mezcla gaseosa, dado su alto contenido en H₂, podría usarse como fuente del mismo, luego de separarlo de los otros componentes gaseosos (CO, CO₂, hidrocarburos, etc.). Otro de los posibles usos de la biomasa forestal es la producción de pellets con destino a la exportación a los países de Europa (AEBIOM, 2008; Hiegl y Janssen, 2009). Este producto tiene un alto precio en el mercado europeo y al mismo tiempo una demanda creciente que supera la capacidad de producción en muchos países ya que es usado tanto para usos domésticos (calefacción de hogares) como industriales (plantas de co-generación). En el futuro se podrán ensayar otros tipos de biomasa o de residuos orgánicos, buscando la valorización de la materia prima desde el punto de vista energético u obteniendo productos de alto valor agregado.

2. Cultivos energéticos con especies de Eucalyptus

2.1 Generalidades

En este contexto, el cultivo de especies forestales con el objetivo de producción de biomasa (plantaciones energéticas) destinada a la obtención de diferentes biocombustibles se muestra como una alternativa interesante. Sin embargo, en términos de cadena agroindustrial presenta algunos aspectos aún no analizados y/o resueltos que sería necesario considerar. Estos aspectos están relacionados con la producción, el impacto ambiental y la valoración económica de los cultivos forestales. Desde el punto de vista productivo es necesario generar y/o adaptar información sobre el potencial de distintas materias primas energéticas en cuanto a los volúmenes potenciales de producción de biocombustibles fundamentalmente sólidos (chips y carbón) y líquidos (etanol y biodiesel).

En relación a aspectos económicos deben realizarse análisis del balance entre el consumo y la producción de energía al final de proceso particular de cada caso.

Esto está muy relacionado a factores tales como (San Miguel et al., 2015):

- alto costo de cosecha y transporte asociados a la baja densidad energética por unidad de volumen
- economía de escala (el aumento de la capacidad reduce los costos fijos e incrementa la eficiencia de conversión)
- precio de la madera (chips) que puedan desviar los usos de la misma

Lo relacionado a la temática ambiental tiene que ver con la conservación del recurso suelo en sistemas de producción con altas densidades de árboles por hectárea, con la particularidad que en estos casos es posible reincorporar los restos (ramas, corteza y hojas) al suelo con el consiguiente reciclado de nutrientes (Achat et al., 2015). El uso de la madera

para la producción de energía presenta menos problemas de contaminación comparada con los combustibles fósiles debido a su bajo contenido de azufre. Se debe tener en cuenta que cuando la biomasa es quemada el carbono reacciona con el oxígeno produciendo calor, dióxido de carbono y agua. Estos dos últimos compuestos son absorbidos por las plantas produciendo nuevamente biomasa. Por tanto, este proceso tiene un balance neutro del ciclo del CO₂ (Estrada y Meneses, 2004).

Dentro de las principales fuentes de biomasa disponibles, se mencionan:

- Residuos de cultivos agrícolas y forestales (rastrajo de cultivos, ramas y corteza de árboles)
- Residuos de procesamiento industrial (bagazo de caña, cascara de arroz, aserrín y costaneros)
- Cultivos energéticos (pasto elefante, swicht grass, miscantho, sorgo dulce, forestaciones energéticas)
- Licor negro derivado del proceso Kraft de producción de pasta de celulosa

La biomasa de origen forestal posee algunas ventajas importantes entre las cuales se mencionan: la renovabilidad, la productividad por unidad de superficie, la generación de empleo, la independencia de la estacionalidad, y las tecnologías disponibles, entre otras. De todos modos, existen algunos aspectos ambientales que deber ser necesariamente contemplados porque no todo lo que es derivado del proceso de fotosíntesis puede ser considerado como sustentable o ambientalmente amigable (Foelkel, 2015).

Se debe tener en cuenta que el aprovechamiento energético de los denominados residuos, en términos generales, tiene una serie de limitaciones importantes (Müller, 2005):

- Es un material heterogéneo debido a la presencia de fracciones de distintas características (poder calórico, humedad, contenido de cenizas, granulometría) lo que requiere de un proceso de homogeneización.
- Baja densidad energética lo que requiere de mayores costos de extracción y transporte
- Normalmente se encuentran distribuidos en grandes superficies
- Alta tasa de extracción de nutrientes del suelo

Estos aspectos determinan que la silvicultura específica para la producción de biomasa tenga algunas ventajas comparativas que, a priori, permiten superar algunas de las limitantes mencionadas anteriormente. En este sentido, dentro de los principales puntos a favor pueden mencionarse:

- Es posible producir un tipo de biomasa relativamente homogéneo a partir de materiales con cierto grado de mejora genética (semilla o clones)
- La biomasa producida está concentrada en espacios más reducidos, lo que permite lograr una mayor densificación energética.
- La obtención de biomasa no depende de otras actividades previas lo que simplifica las operaciones de logística.

Estos nuevos sistemas silviculturales para la producción de biomasa están siendo evaluados e implementados en algunos países como en Brasil, Australia, Nueva Zelanda, Alemania, Finlandia, fundamentalmente con especies del género *Eucalyptus*, *Populus*, y *Salix*. Estos modelos alteran los esquemas silviculturales convencionales, en tanto la densidad de árboles por hectárea, como por el turno de corta del monte. Cabe recordar que en

los montes destinados a la producción de celulosa y madera sólida normalmente se utilizan densidades comprendidas entre los 1000 a 1500 árboles ha⁻¹ y turnos de corta de 10 a 15 años, respectivamente (Pou, 2011). Los sistemas de plantación denominados adensados o energéticos tienen como principal objetivo maximizar la producción de biomasa en plazos relativamente cortos. En términos generales este tipo de cultivos se caracterizan por dos aspectos: a) se utilizan densidades superiores a los 2000 árboles ha⁻¹ y b) los turnos de cosecha están próximos a los 4 o 5 años, dependiendo de la densidad utilizada. Estos cultivos también tienen la particularidad de que deben poseer una alta capacidad de rebrote por lo que se espera que deban tener unas 3 a 5 rotaciones (Seixas, 2008). De acuerdo a este autor un cultivo energético debe cumplir con, al menos, los siguientes criterios:

- Un mínimo de 80% de sobrevivencia de los árboles plantados
- Una productividad anual mayor a 10-12 toneladas de materia seca por hectárea
- Uniformidad en el tamaño de los árboles

Comúnmente los términos adensados y energéticos se utilizan como sinónimos, pero en sentido estricto el primero se refiere a cultivos con altas densidades de plantación (como las mencionadas). En este trabajo vamos a entender por cultivo energético un tipo de plantación forestal cuyo diseño tiene como objetivo optimizar la producción y cosecha de material vegetal lignocelulósico que va a ser utilizado con diversos fines, en particular la producción de biomasa con fines energéticos. Estos pueden ser térmicos, para calefacción, usos industriales, o producción de electricidad como producto final o en procesos de conversión que proporcionan, además, otros productos distintos a los energéticos (por ejemplo, la producción de combustible líquido o gaseoso). Otro término que se utiliza para este tipo de sistemas es de cultivos forestales de corta rotación (SRFC de su sigla en inglés: short rotation forestry coppice). De la superficie total plantada con este tipo de cultivos a nivel mundial, las especies latifoliadas representan un 60%, mientras que la superficie ocupada con especies del género *Eucalyptus* es del orden del 40% (Seixas, 2008),

El marco de plantación y, por tanto, la cantidad de árboles plantados es una de las herramientas de manejo silvicultural que mayor impacto tienen sobre el comportamiento de un monte ya desde las primeras etapas del cultivo (Gonçalves et al., 2004). La densidad de plantación tiene efectos sobre el grado de competencia entre individuos, lo que en definitiva se traduce en efectos sobre la tasa de crecimiento individual, las características de la copa, la sobrevivencia, la fisiología del árbol, la dinámica de nutrientes, el momento de cosecha y la productividad a turno final.

Durante el desarrollo de un cultivo suceden cambios en las curvas de crecimiento, las cuales, en general, son medidas en términos de incremento corriente anual (ICA o CAP) para expresar el cambio en un periodo de un año y de incremento medio anual (IMA o CAM), que indica el crecimiento medio desde la plantación hasta un momento determinado (Figura 1).

Este patrón de crecimiento para los cultivos forestales se caracteriza por una tasa creciente del incremento corriente en las etapas tempranas hasta alcanzar un máximo, a partir del cual ocurre una progresiva disminución hasta alcanzar un valor de casi cero. El IMA tiene un comportamiento similar, pero en etapas posteriores del ciclo del cultivo. El cruce de ambas curvas corresponde al punto de máxima producción física en el mínimo de

tiempo y es el momento que determina la etapa de rotación técnica o momento de cosecha (Barrero et al., 2011).

El estudio del crecimiento de una plantación, en la mayoría de los casos, ha puesto énfasis en el crecimiento total del rodal y han dejado de lado los cambios que ocurren en la estructura del mismo. Esto ha tenido como resultado distintos tipos de evaluaciones de respuesta frente a diferentes densidades de plantación y esquemas de raleo, los cuales se han centrado en parámetros del crecimiento individual del árbol (por ejemplo, diámetro a la altura del pecho y área basal). La investigación más reciente ha puesto el foco en entender los cambios en los patrones de crecimiento y, en particular, en la reducción del crecimiento que comienza a ocurrir luego de los primeros años de instalado el cultivo (Harris, 2007). Existen varios factores que están asociados a esta disminución en la tasa de crecimiento, los cuales están relacionados a la competencia entre individuos (Binkley et al., 2002), al aérea foliar, la tasa de respiración/actividad fotosintética, y la disponibilidad de agua y nutrientes (Ryan et al., 2008, Stape et al., 2010).

A diferencia de una plantación convencional, en los cultivos de alta densidad hay una alta productividad inicial, como fue mencionado anteriormente, debido a una mayor tasa de ocupación del sitio, lo que provoca que en un plazo muy breve comiencen a ocurrir cambios en el comportamiento individual de los árboles, debido a un incremento de la competencia entre los mismos. Los efectos de la rápida competencia entre árboles (asociada a las altas densidades) determinan una serie de cambios silviculturales, tanto en el crecimiento como en la estructura de los diferentes componentes del árbol y del rodal. Los resultados reportados en la literatura muestran que con altas densidades se obtienen altos niveles de producción por hectárea, árboles con una alta relación altura/diámetro, árboles de menor tamaño y con copas más reducidas, mayores índices de mortalidad y mayor heterogeneidad en el tamaño de los individuos (Oliveira Neto et al., 2010; Santos, 2011; Díaz Bravo et al., 2012; Machado et al., 2012; Rodríguez et al. 2013; Schneider et al., 2015; Soares et al., 2016; Van Gust et al., 2016; Albaugh et al., 2017). También se reportan importantes niveles de extracción de nutrientes contenidos en las ramas, hojas y corteza para el caso de especies de eucaliptos (Poggiani et al., 1984; Foelkel, 2005; Couto et al., 2009; Bentancor, 2019). Esto último, forma parte de los aspectos que dan lugar a polémica con respecto al uso de este tipo de sistemas de producción de biomasa con especies de eucaliptos con altas tasas de crecimiento.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que en estos sistemas de producción se cosecha el árbol entero (fuste y copa), lo que determina que la biomasa resultante este formada por todas las fracciones del árbol. El producto obtenido es una mezcla de las distintas fracciones del árbol, compuesta por la madera, la corteza, las ramas y las hojas, lo que resulta en un material heterogéneo desde el punto de vista de su granulometría, contenido de humedad, composición química y, por lo tanto, en sus propiedades tecnológicas (Knapić et al., 2014). La evaluación de este tipo de cultivos, a diferencia de los denominados convencionales (para madera sólida o celulosa), requiere de la cuantificación de las distintas fracciones lo que implica medir o estimar por algún método, el peso por separado de cada componente del árbol. Las propiedades tecnológicas de la biomasa dependen en gran medida del proceso al que sea sometida y del tipo de combustible que se quiera obtener.

En términos energéticos los principales puntos a favor de la biomasa proveniente de *Eucalyptus* de acuerdo con Foelkel, (2005) son:

- Homogeneidad de la composición química (holocelulosa, lignina y extractivos)
- Bajo contenido de azufre, cenizas y nitrógeno
- Poder calórico relativamente alto
- Metodologías sobre los procesos de producción, procesamiento y transporte

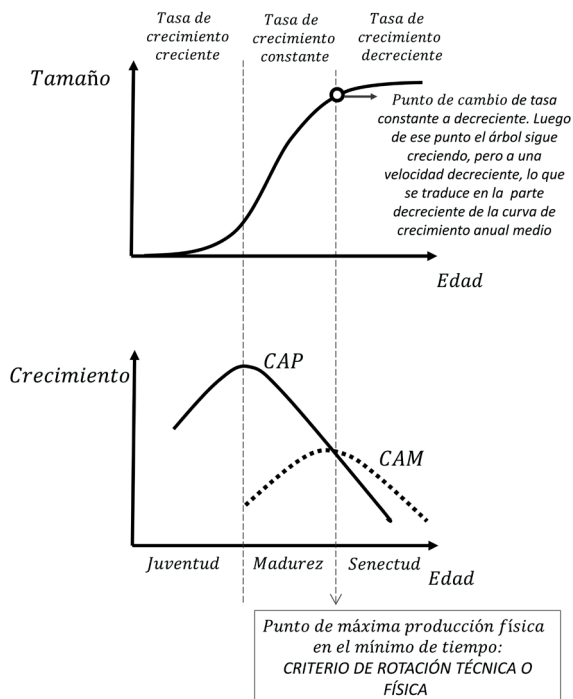


Figura 1. Patrón general de cambios en el CAP e CAM de cultivo forestal a lo largo del tiempo (Sorrentino, 1994).

A su vez, la madera de eucalipto posee una elevada adecuación para la combustión, con bajo nivel de emisiones (Scholz y Ellerbrock, 2002) y baja tendencia a la sinterización, lo que repercute en el buen funcionamiento y bajo mantenimiento de los equipos. También se destaca el balance energético muy positivo frente a otros cultivos utilizados con este mismo propósito, en torno a 13 unidades energéticas generada por unidad de energía consumida (Balsari y Airolidi, 2002), llegando incluso a citarse balances que alcanzan valores de 20. De acuerdo a Zanetti, (2008), existen expectativas de que para el etanol celulósico el balance energético alcance una relación de 1:36.

2.2 Aplicación a regiones de Sudamérica

En función de la experiencia obtenida en distintos países de la región sur con varias especies de eucaliptos es posible afirmar que son las de mayor potencial desde el punto de vista de la producción de biomasa y de las características energéticas (densidad de la madera y poder calórico) (Eloy et al., 2015). Los cultivos con especies de eucaliptos han mostrado un interesante potencial para la generación de energía en distintas regiones del mundo: Chile (Rodríguez et al., 2013; Albaugh et al., 2017; Acuña et al., 2018), Brasil (Müller, 2005; Guerra et al., 2014; Foelkel, 2015, Eufrede Junior et al. 2018), Francia (Perez et al., 2010), Italia (Spinelli et al., 2009), y España (Pérez et al., 2011; Ciria, 2011; Jiménez et al., 2013; Rodríguez et al., 2014) y Australia (Harris, 2007), entre otros. De acuerdo a Seixas (2008), del total de la superficie de cultivos energéticos plantadas a nivel mundial aproximadamente el 40% es con especies de eucaliptos. Las principales ventajas de las especies plantadas a escala comercial es que combinan varias características de interés: se adaptan a un amplio rango de condiciones ambientales, tienen altas tasas de crecimiento, valores medios de densidad de la madera, interesantes propiedades tecnológicas (contenido de energía), alta capacidad de rebrote, alta tolerancia a la competencia y tener un balance energético positivo (Cabrera et al., 2014; Foelkel, 2015). Los cultivos energéticos con eucaliptos, independientemente de la especie de que se trate, tienen como objetivo la producción de grandes cantidades de biomasa en turnos relativamente cortos. Esto permite el uso de superficies relativamente reducidas y al mismo tiempo asegurar un suministro de materia prima a costos competitivos (Ciria, 2011). Esto implica que las densidades de plantación estén por encima de los 2000 a 3000 árboles ha⁻¹ y turnos que van desde los 2 a 8 años, dependiendo de la especie, el marco de plantación y las condiciones de crecimiento. La viabilidad económica de este tipo de plantaciones implica que la rotación del cultivo debe extenderse a dos o tres turnos posteriores a la primera cosecha ya que las mismas tienen altos costos de instalación. La identificación del momento óptimo de cosecha debe tener en cuenta tanto la producción de biomasa, las características del fuste (lo cual determina el tipo de maquinaria de cosecha y procesamiento) y las propiedades tecnológicas de la misma (Baettig et al., 2010). En términos generales, es conocido el efecto que tienen algunos espaciamientos sobre el crecimiento de los eucaliptos en zonas en donde las mismas alcanzan altas tasas de crecimiento (Stape et al., 2010). Las especies que mayor potencial muestran para ser usadas en cultivos de corta rotación son *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. benthamii*, *E. globulus*, *E. maidenii*, *E. urophylla*, *C. citriodora* (ex *E. citriodora*) *E. tereticornis* y *E. camaldulensis* pero es importante tener en cuenta las diferencias en los niveles de productividad que muestran los distintos materiales genéticos que componen estos géneros, y su respuesta en las distintas situaciones agroecológicas (Balmelli y Resquin, 2006 ab). Estas son especies que cuentan, además, con una base genética amplia, ciclos de mejora breves, facilidad para la multiplicación vegetativa, capacidad de rebrotar tras la corta, etc.; características, todas ellas, que las adecuan para esta finalidad productiva. En ese sentido, varios autores reportan niveles de productividad del orden de 15 a 35 toneladas de materia seca por hectárea y por año en primera rotación (Bernardo et al., 1998; Leite et al., 1997; Sims et al., 1999; Leles et al., 2001; Sims et al., 2001; Goulart et al., 2003; Gonçalves et al., 2004; Foelkel, 2015). Estos antecedentes, sin bien no son directamente extrapolables a las

condiciones del país, indicarían que esos sistemas de producción tendrían un alto potencial de producción de biomasa y por tanto de energía por unidad de superficie y tiempo.

Algunos autores, en cambio, señalan que los mayores espaciamientos tienen algunas ventajas: se obtiene mayor retorno del capital invertido, se facilitan las operaciones mecánicas después de la plantación, y hay una tasa menor de mortalidad y de árboles dominados (Stape, 2006; Hakamada, 2012). De acuerdo a este último autor, la densidad de plantación más rentable para la producción de biomasa es muy similar que para la de celulosa y se encuentra entre 900 y 1600 árboles por hectárea con un turno de 6 a 8 años. Este tipo de análisis tienen en cuenta los altos costos de plantación y de cosecha, asociados a las mayores densidades de plantación.

Al mismo tiempo, existen una serie de interrogantes que deberían ser respondidas y que tienen que ver con algunos aspectos de la sustentabilidad de este tipo de cultivos en particular para los materiales genéticos de alta productividad. Esto es especialmente importante en suelos de bajo aporte de nutrientes o en situaciones de déficit hídrico (Stape, 2006; Hakamada, 2012; Scatolini, 2012; de Paula Lima, 2012). Otro aspecto a tener en cuenta es que el marco de plantación de este tipo de cultivos produce una alta densificación en la línea de plantación, lo cual se contrapone con una distribución uniforme de las plantas que da lugar a un uso menos eficiente del agua y de los nutrientes. En relación al balance de nutrientes, además de una mayor extracción por utilizar toda la biomasa aérea (madera, corteza y copa) se producen cosechas en periodos relativamente cortos (3 a 5 años). Varios estudios con especies de eucaliptos muestran que la cantidad de nutrientes contenidos en la madera juvenil es sustancialmente mayor que en edades más avanzadas, a pesar de que los árboles tienen tamaños de copa reducidos en las primeras etapas del crecimiento (Poggiani, 1980; Poggiani et al., 1983 y 1984; Bentancor, 2019). Esto implicará un aumento sustancial en la necesidad del aporte de nutrientes para mantener la productividad en el largo plazo. Estos autores afirman, por tanto, que desde el punto de vista de la "economía de los nutrientes" las rotaciones más largas son más convenientes que los ciclos cortos, debido a que en estas últimas ocurre un mayor reciclaje de nutrientes lo cual determina que las masas forestales sean más estables en el largo plazo. En tal sentido, se mencionan algunas alternativas para mitigar estos efectos, como es el uso de materiales genéticos que posean alta eficiencia de producción de biomasa con bajos niveles de nutrientes (Poggiani, 1980); o dejar en campo algunas fracciones como, por ejemplo, la corteza por su alto contenido de Ca y K (Müller, 2005; Andrade et al., 2011). A esos efectos, hay que sumarle los posibles efectos de compactación por el tránsito sucesivo de equipos de cosecha debido a los cortos turnos de rotación (Scatolini, 2012).

Referencias

- Achat, D.L., Deleuze, C., Landmann, G., Pousse, N., Ranger, J., Augusto, L. (2015). Quantifying Consequences of Removing Harvesting Residues on Forest Soils and Tree Growth - A Meta-Analysis. Elsevier B.V. *Forest Ecology and Management*, 348, 124–41. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.042>

- Acuña, E., Rubilar, R., Cancino, J., Albaugh, T.J., Maier, C.A. (2018). Economic assessment of *Eucalyptus globulus* short rotation energy crops under contrasting silvicultural intensities on marginal agricultural land. *Land Use Policy*, 76(May), 329–337. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.05.028>
- AEBIOM. (2008). *A Pellet Road Map for Europe*. European Biomass Association. https://www.canadianbiomassmagazine.ca/images/stories/pellet_roadmap_final.pdf
- Albaugh, T.J., Rubilar, R.A., Maier, C.A., Acuña, E.A., Cook, R.L. (2017). Biomass and nutrient mass of *Acacia dealbata* and *Eucalyptus globulus* bioenergy plantations. *Biomass and Bioenergy*, 9, 162–171. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.12.025>
- Andrade, G. d. C., Bognola, I.A., Bellote, A.F.J., Franciscon, L., Waterloo, M.J., Bruijnzeel, L.A. (2011). Site Evaluation and Productivity of a 3-Year Old Stand of *Eucalyptus urograndis* in São Paulo, Brazil. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31(68), 331–346. <https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.68.331>
- Baettig, R., Yáñez, M., Albornoz, M. (2010). Cultivos dendroenergéticos de híbridos de álamo para la obtención de biocombustibles en Chile: estado del arte. *Bosque*, 31(2), 89–99. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002010000200002>
- Balmelli, G., Resquin, F. (2006a). Productividad de Diferentes Especies de *Eucalyptus* Sobre Areniscas de Tacuarembó-Rivera." *Serie Técnica 159. INIA Tacuarembó*, 159, 305–312.
- Balmelli, G., Resquin, F. (2006b). Productividad de Diferentes Especies de *Eucalyptus* Sobre Areniscas de Tacuarembó-Rivera. *30 Años de Investigación en Suelos de Areniscas INIA Tacuarembó. Serie Técnica*. Montevideo. UY.
- Balsari, P., Airoldi, G. (2002). Valutazione Energetica Ed Economica di una Coltivazione di Pioppo per La Produzione Di Biomasa. *Rivista Di Agronomia*, 26: 163–169.
- Barrero, H., Peraza, O., Álvarez, D., Guera, M. (2011). Determinación Del Turno de Corta Para *Pinus caribaea* var. *caribaea* En La Empresa Forestal Integral Macurije. *Floresta e Ambiente* 18 (1), 109–115. <https://doi.org/10.4322/loram.2011.028>
- Bentancor, L., Hernandez, J., del Pino, A., Califra, A., Resquín, F., González-Barrios, P. (2019). Evaluation of the biomass production, energy yield and nutrient removal of *Eucalyptus dunnii* Maiden grown in short rotation coppice under two initial planting densities and harvest systems. *Biomass and Bioenergy*, 122(January), 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.019>
- Bernardo, A.L., Reis, M.G.F., Reis, G., Harrison, R.B., Firme, D.J. (1998). Effect of Spacing on Growth and Biomass Distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* and *E. urophylla* Plantations in Southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 104: 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00199-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00199-0)
- Binkley, D., Stape, J.L., Ryan, M.G., Barnard, H.R., Fownes, J. (2002). Age-Related Decline in Forest Ecosystem Growth: An Individual- Tree, *Stand-Structure Hypothesis*. *Ecosystems*, 5, 58–67. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0055-7>
- Cabrera, A., Tozzini, C., Espinoza, S., Santelices, R., Bonari, E. (2014). Cálculo del balance energético de una plantación de *Populus deltoides* clon Lux con fines energéticos en un sitio con ambiente mediterráneo. *Bosque*, 35(2), 133–139. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002014000200001>
- Carrillo, L. (2004). Energía de Biomasa. Fotosíntesis. Biomasa. Conversión Por Microorganismos. *Biogas. Etanol. Biodiesel*. Edición de Jujuy-Argentina. 83 p.

- Ciria, P. (2011). Desarrollo de los cultivos energéticos leñosos en España. *Vida Rural*, CEDER-CIEMAT (Soria). Unidad de Biomasa:10–15.
- Couto, L., Abrahão, C.P., Carneiro, A.C.O., Nogueira, G.S., Leite, H.G., Couto, L.C., Müller, M.D., Santana, R.C. (2009). *Efeito Do Espaçamento Sobre a Produção de Biomassa Em Florestas Energéticas de Eucalipto*. Rede Nacional De Biomassa Para Energia. <http://www.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/273/232>
- de Paula Lima, W. (2012). O Assunto Requer Cuidado Alias Muito Cuidado! *Revista Opiniões*. <http://revistaonline.revistaopinioes.com.br/revistas/flo/71/#page/38>.
- Díaz Bravo, S., Espinosa, M., Valenzuela, L., Cancino, J., Lasserre, J.P. (2012). Efecto del raleo en el crecimiento y algunas propiedades de la madera de *Eucalyptus nitens* en una plantación de 15 años. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 14(3), 373-388. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2012005000009>
- Eloy, E., Caron, B.O., da Silva, D.A., Souza, V.Q., Trevisan, R., Behling, Al., Elli, E.F. (2015). Produtividade Energética de Espécies Florestais Em Plantios de Curta Rotação. *Ciência Rural*, 45(8), 1424–1431. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20130177>
- Estrada, C.A., Meneses, A.Z. (2004). Gasificación de Biomasa Para Producción de Combustibles de Bajo Poder Calorífico y Su Utilización En Generación de Potencia y Calor. *Scientia et Technica*, 2(25).
- Eufrade-Junior, H. de J, Guerra, S.P.S., Sansígolo, C.A., Ballarin, A.W. (2018). Management of *Eucalyptus* short-rotation coppice and its outcome on fuel quality. *Renewable Energy*, 121, 309–314. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.033>
- Foelkel, C. (2005). Minerais e Nutrientes Das Árvores Dos Eucaliptos: Aspectos Ambientais, Fisiológicos, Silviculturais e Industriais Acerca Dos Elementos Inorgânicos Presentes Nas Árvores. *Eucalyptos Online Book & Newsletter*, 133.
- Foelkel, C. (2015). Qualidade Da Biomassa Florestal Do Eucalipto Para Fins Energéticos. *Eucalyptos Newsletter*, 49.
- Gonçalves, J.L. de M., Stape, J.L., Laclau, J.-P., Smethurst, P., Gava, J.L. (2004). Silvicultural Effects on the Productivity and Wood Quality of Eucalypt Plantations. *Forest Ecology and Management*, 193(1–2), 45–61. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.022>
- Goulart, M., Haselein, C.R.H., Hoppe, J.M., Farias, J.A., Pauleski, D.T. (2003). Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* Sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. *Ciência Florestal* 13 (2), 167–175. <https://doi.org/10.5902/198050981753>
- Guerra, S.P.S., Garcia, E.A., Lanças, K.P., Rezende, M.A., Spinelli, R. (2014). Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production. *Fuel*, 137, 360–363. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.07.103>
- Hakamada, R. (2012). Inovação Tecnológica Há Mais de Um Século. *Revista Opiniões*. <http://revistaonline.revistaopinioes.com.br/revistas/flo/71/#page/19>.
- Harris, F. (2007). *The effect of competition on stand, tree, and wood growth and structure in subtropical Eucalyptus grandis plantations*, PhD thesis, Southern Cross University, Lismore, NSW. 193 p.
- Hiegl, W., Janssen, R. (2009). Development and Promotion of a Transparent European Pellets Market. Creation of an European Real-Time Pellets Atlas. <http://www.pellet-satlas.info>.

- Jiménez Bocanegra, J.A., F. Perea Torres, J. Lobo García, L. Pavón Prada, V.H. Durán Zuazo. (2013). Evaluación del cultivo de eucalipto para la producción de biomasa en Andalucía, Vida RURAL 1:62–66.
- Knapić, S., M. Pirralho, J.L. Louzada, H. Pereira. (2014). Early Assessment of Density Features for 19 *Eucalyptus* Species Using X-Ray Microdensitometry in a Perspective of Potential Biomass Production. Wood Sci Technol 48 (1), 37–49.
- Leite, F.P., N.F. de Barros, R.F. de Novais, L.M.A. Sans, A.S. Fabres. (1997). Crescimento de *Eucalyptus grandis* Em Diferentes Densidades Populacionais. Árvore 21 (3), 313–21.
- Leles, P.S.D.S., G.G.D. Reis, M.D.G.F. Reis, E.J.D. Morais. (2001). Crescimento, Produção e Alocação de Matéria Seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. pellita* Sob Diferentes Espaçamentos Na Região de Cerrado, MG. Scientia Forestalis 59: 77–87.
- Machado, F.De C., S. Philipe, S. Guerra, N. Ceragioli, G. Oguri. (2012). Influência do espaçamento na produtividade e alocação de biomassa em um plantio de *Eucalyptus grandis*. In Congresso Internacional de Bioenergia, 1–6.
- Müller. M.D. (2005). Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/31/129121_c.pdf?sequence=2&isAllowed=y.
- Oliveira Neto, S.N., G.G. dos Reis, M.G.F. Reis, H.G. Leite, J.C.L. Neves. (2010). Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região de Cerrado de Minas Gerais. Floresta, 40 (4), 755-762.
- Perez, D., A. Guillemain, A. Berthelot, N. N'Guyen-The, F. Morogues, C. Gomes. (2010). Evaluation of forestry biomass quality for the production of second-generation bio-fuels. Cellulose chemistry and technology, 44(1–3), 1–14.
- Pérez, S., C.J. Renedo, A. Ortiz, M. Mañana, F. Delgado, C. Tejedor. (2011). Energetic density of different forest species of energy crops in Cantabria (Spain). Biomass and Bioenergy, 35: 4657–4664.
- Poggiani, F. (1980). Florestas Para Fins Energéticos e Ciclagem de Nutrientes. IPEF - Série Técnica 1 (2), 1–11.
- Poggiani, F., H.T. Couto, W.S. Suiter Filho. (1983). Biomass and Nutrient Estimates in Short Rotation Intensively Cultured Plantation of *Eucalyptus grandis*. Revista Do Ipef 23 (23), 29–36.
- Poggiani, F., S. Zen, F.S. Mendes, F. Spina-França. (1984). Ciclagem e Exportação de Nutrientes Em Florestas Para Fins Energéticos. Ipef 27: 17–30.
- Pou, R. (2011). Caracterización de la forestación en Uruguay. Aspectos técnicos, empresariales del desarrollo forestal a mayo del año 2011. Rosario Pou & Asociados. 14 p. Available at: <http://www.uruguayforestal.com/informes/Forestacion%20en%20Uruguay-2011.pdf>
- Rodríguez, A., J. Cancino, E. Acuña, R. Rubilar, E. Muñoz. (2013). Evaluación del crecimiento de plantaciones dendroenergéticas de *Eucalyptus globulus*, según densidad de plantación y turno de rotación en suelos contrastantes de la región del Biobío, Chile. Cienc. Investig. For. INFOR Chile, 19 (1), 7-18.

- Rodríguez, C.R., V.H. Durán, C. Biielders, J.A. Jiménez, F. Perea, J.R. Francia. (2014). Bioenergy farming using woody crops. A review. *Agronomy for sustainable development*, 35(1), 95–119.
- Ryan, M.G., D. Binkley, J.L. Stape. (2008). Why Don ' t Our Stands Grow Even Faster ? Control of Production and Carbon Cycling in Eucalypt Plantations Why Don ' t Our Stands Grow Even Faster ? Control of Production and Carbon Cycling in Eucalypt Planta. *Southern Forests: A Journal of Forest Science* 70 (2), 99–104.
- San Miguel, G., B. Corona, D. Ruiz: D. Landholm, R. Laina, E. Tolosana, H. Sixto, I. Cañellas. (2015). Environmental, energy and economic analysis of a biomass supply chain based on a poplar short rotation coppice in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 94: 93–101.
- Santos, M.D. (2011). Efeito Do Espaçamento de Plantio Na Biomassa Do Fuste de Um Clone Híbrido Interespecífico de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista Botucatu, Brazil. 152 p.
- Schneider, P.R., C.A. Guimarães Finger, P.S. Pigatto Schneider, F.D. Fleig, T.A. da Cunha. (2015). Influência do espaçamento no autodesbaste de povoamento monoclonal de *Eucalyptus saligna* Smith. *Ciência Florestal*, Santa Maria, 25 (1), 119-126.
- Scatolini, F.M. (2012). Floresta Adensada: Alguns Aspectos a Considerar. *Revista Opiniones*. <http://revistaonline.revistaopinioes.com.br/revistas/flo/71/#page/25>.
- Scholz, Vo., R. Ellerbrock. (2002). The Growth Productivity, and Environmental Impact of the Cultivation of Energy Crops on Sandy Soil in Germany. *Biomass and Bioenergy* 23 (2), 81–92.
- Seixas, F. (2008). Harvesting and Use of Forestry Biomass for Energy Production in the USA. Auburn, Alabama, USA. Southern Research Station USDA Forest Service. 118 p.
- Sims, R.E.H., T.G. Maiava, B.T. Bullock. (2001). Short Rotation Coppice Tree Species Selection for Woody Biomass Production in New Zealand. *Biomass and Bioenergy* 20 (5), 329–35.
- Sims, R.E.H., A. Hastings, B. Schlamadinger, G. Taylor, P. Smith. (2006). Energy Crops: Current Status and Future Prospects. *Global Change Biology* 12: 2054–76.
- Sims, R.E.H., Ki. Senelwa, T. Maiava, B.T. Bullock. (1999). *Eucalyptus* Species for Biomass Energy in New Zealand—I: Growth Screening Trials at First Harvest. *Biomass and Bioenergy* 16 (3), 199–205.
- Soares, A.V., H.G. Leite, A.L. Souza, S.R. Silva, H.M. Lourenço, D.I. Forrester. (2016). Increasing stand structural heterogeneity reduces productivity in Brazilian *Eucalyptus* monoclonal stands. *Forest Ecology and Management* 373: 26–32
- Sorrentino, A. (1994). Manual teórico - práctico: técnicas e instrumentos de medición forestal. Montevideo: Facultad de Agronomía. 2 v. 312 p.
- Spinelli, R., S.M. Ward, P.M. Owende. (2009). A harvest and transport cost model for *Eucalyptus* spp. fast-growing short rotation plantations. *Biomass and Bioenergy*. Elsevier Ltd, 33(9), 1265–1270.

- Stape, J.L., D. Binkley, M.G. Ryan, S. Fonseca, R.A. Loos, E.N. Takahashi, C.R. Silva, S.R. Silva, R. Hakamada, J.M.A. Ferreira, A.M.N. Lima, J.L. Gava, F.P. Leita, H.B. Andrade, J.M. Alves, G.G.C Silva, M.R. Azevedo. (2010). The Brazil *Eucalyptus* Potential Productivity Project: Influence of Water, Nutrients and Stand Uniformity on Wood Production. *Forest Ecology and Management* 259 (9), 1684–1694.
- Stape, J.L. (2006). Espaçamento de Plantio. Conceitos e Aplicações. Piracicaba, Brazil. <http://www.tume.esalq.usp.br/simp/arquivos/espacamento.pdf>.
- Sunde, K., A. Brekke, B. Solberg. (2011). Environmental Impacts and Costs of Woody Biomass-to-Liquid (BTL) Production and Use - A Review. *Forest Policy and Economics*. Elsevier B.V. 13 (8), 591–602.
- Swain, P.K., L.M. Das, S.N. Naik. (2011). Biomass to Liquid: A Prospective Challenge to Research and Development in 21st Century. *Renewable and Sustainable Energy*. Elsevier Ltd. *Reviews* 15 (9), 4917–33.
- Van Gunst, K.J., P.J. Weisberg, J. Yang, Y. Fan. (2016). Do denser forests have greater risk of tree mortality: A remote sensing analysis of density-dependent forest mortality. *Ecology* 96(11), 2855-2861
- Zanetti, E.A. (2008). Balanço de Carbono. *Revista Opiniões*. <http://revistaonline.revistaopinioes.com.br/revistas/flo/34/#page/32>.
- Zsuffa, L., W.A. Kenney, R.L. Gambles. (1992). Wood Feedstock Qualities for Energy Conversion and the Potential for Their Biological Improvement. *Biomass and Bioenergy* 2 (1–6), 55–69.

Producción de biomasa del fuste de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cabbage, *Eucalyptus dunnii* Maiden y *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden en plantaciones de corta rotación en Uruguay

Fernando Resquin^{1*}, Leonidas Carrasco-Letelier²,
Cecilia Rachid-Casnatti¹, Rafael Navarro-Cerrillo³

¹Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Programa Nacional de Investigación en Producción Forestal, Estación Experimental del Norte, INIA Tacuarembó, Ruta 5 km 386, Tacuarembó, Uruguay.

²Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Programa de Producción y Sustentabilidad Ambiental, Estación Experimental INIA La Estanzuela Alberto Boerger, Ruta 50 km 11, 39173, Colonia, Uruguay.

³Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes (ETSIAM), Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, Carretera Nacional IV, km 396, Córdoba, España.

*Autor para correspondencia: fresquin@inia.org.uy

1. Introducción

A partir de la crisis del petróleo en los años 70 la valorización de la biomasa ha cobrado cada vez mayor importancia en el escenario energético mundial (Eloy et al., 2014). A lo largo de ese periodo ha ocurrido una fuerte transición de los usos de la biomasa, desde los de bajo nivel tecnológico (por ejemplo, leña para la cocción de alimentos) a usos más modernos como la generación de electricidad, calor y distintos tipos de combustibles. Uno de los factores más relevantes para su adopción, independientemente de la tecnología utilizada, ha sido la reducción de los costos de aprovechamiento y transporte (Macedo, 2003). Por esta razón, las líneas de investigación a nivel mundial han estado orientadas al desarrollo de procesos más eficientes de conversión en el uso de la madera y a la mejora en las técnicas de manejo y cosecha de cultivos energéticos. Esto se origina por el hecho de que en las últimas décadas el consumo de energía es cada vez mayor y que se espera, de acuerdo

a la Agencia Internacional de la Energía, que la demanda aumente un 36% para el año 2035 con respecto al consumo en el año 2008 (IEA 2010). No obstante, actualmente el 40% del consumo mundial de energía se basa en los combustibles de origen fósil. En este escenario la mejor forma de asegurar el suministro para satisfacer esa demanda es el desarrollo de diferentes alternativas energéticas que mejor se adapten a cada región (Pleguezuelo et al., 2014). Una de las opciones que permiten reducir la dependencia del petróleo, y al mismo tiempo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, son las energías derivadas de materiales lignocelulósicos, y en particular las de origen forestal (Eufrade Junior et al., 2016). Este tipo de materiales además de ser renovables tienen diversos tipos de aplicaciones energéticas industriales (Hinchee et al., 2011).

La información que surge en los últimos años muestra que existen una serie de procesos denominados por su sigla en inglés BTL (biomasa a líquido) o BTG (biomasa a gas) que podrían llegar a ser usados a nivel comercial en los próximos años (Yaman, 2004; Swain et al., 2011; Bensaid et al., 2012; Yang et al., 2014; IRENA 2016). En términos generales, los cultivos energéticos ocupan una proporción menor en el total de la energía producida a partir de biomasa pero la tendencia es a un aumento en las próximas década (Sims et al., 2006). De acuerdo con este autor, la energía primaria proveniente de la biomasa representa un 13.4% del total de la energía generada a nivel mundial.

Las especies de *Eucalyptus* han demostrado adaptarse a un amplio rango de ambientes y tienen una densidad de la madera relativamente alta, lo cual la hace a estas especies particularmente aptas para la producción de biomasa (Rockwood et al., 2008). En algunos países, como Brasil, la madera es usada como precursor del carbón para reducir el hierro, produciendo el denominado “acero verde” (Rocha et al., 2016). Al mismo tiempo han demostrado muy buenos resultados en sistemas de cultivos de alta densidad de plantación (Short Rotations Forestry Crops), tanto desde el punto de vista del crecimiento (Sims et al., 2001; Müller, 2005; Sochacki et al., 2007; Eufrade Junior et al., 2016; Lopes et al., 2017), como para la producción de diferentes tipos de combustibles (Balloni y Simões, 1980; Sturion, 1988; Senelwa y Sims, 1999; Rockwood et al., 2008; Pérez et al., 2011; Nuberg et al., 2015).

Uruguay no ha sido la excepción a la expansión de este género, y desde la promulgación de la ley forestal del año 1989 la superficie plantada con varias especies de eucalipto ha crecido en forma sostenida, ocupando una superficie actual próxima a las 700 000 ha (MGAP-DGF, 2017). Por otro lado, se ha impulsado la producción de combustibles líquidos para substituir las importaciones de petróleo (aunque en porcentajes de poca magnitud) a través de un marco legal que básicamente promueve la producción de etanol y biodiesel de segunda generación. En Uruguay, por tanto, los sistemas SRFC con especies de *Eucalyptus*, a priori, son una alternativa para la producción de biomasa con destino a la generación de distintos tipos de combustibles. Existe abundante evidencia experimental y empírica que indica cuales son las especies, sitios y prácticas silviculturales que permiten obtener altos niveles de crecimiento en sistemas de producción de celulosa y madera sólida (Balmelli y Resquin, 2006). Las especies de mayor productividad son *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. benthamii*, *E. maidenii*, y *E. globulus*, pero también están siendo cada vez mas utilizados los híbridos interespecíficos. Estas especies se caracterizan por tener una densidad de la madera relativamente alta (Tuset et al., 2008; Turvey, 2015) y ser tolerantes a la competencia (Jacobs 1995; Tomé y Verwijst, 1996), lo cual las hace aptas para la producción de biomasa en

turnos cortos. Para esto es necesario determinar cómo es la respuesta de esas especies frente a este tipo de sistemas de producción.

En este sentido, surge el interés en evaluar el efecto del espaciamiento a través de la competencia sobre la edad de corte y las propiedades de la madera. El espaciamiento y la edad de corte son parámetros que en muchos casos están estrechamente relacionados de forma tal que se pueden conseguir turnos cortos de cosecha con espaciamientos reducidos (Harris, 2007). Esto está asociado al conocido efecto que el espaciamiento ejerce sobre el crecimiento (Sale, 2005; Harris, 2007; Machado et al., 2012). En la determinación del momento óptimo de cosecha en sistemas de producción de biomasa es importante tener en cuenta el concepto de rendimiento gravimétrico el cual depende de la combinación del crecimiento en volumen y de la densidad de la madera. Esos factores determinan el peso seco de un árbol, el cual es de vital importancia al momento de estimar el rendimiento de un rodal (Berger, 2000). Según algunos autores es probable registrar incrementos en la producción de biomasa más allá del estancamiento del crecimiento en volumen debido a un aumento de la densidad de la madera con el paso del tiempo (Balloni y Simões, 1980; Souza, 1989; Lopes et al., 2017). El efecto de la densidad de plantación sobre las propiedades de la madera, y en particular sobre la densidad de la misma, en especies de *Eucalyptus* ha sido ampliamente estudiada. Los resultados obtenidos indican que el espaciamiento puede tener diversos efectos sobre la densidad de la madera, desde situaciones en donde la densidad aumenta con la disminución del área ocupada por cada planta (DeBell et al., 2001; Müller, 2005; Eloy et al., 2014; Rocha et al., 2016), a casos en donde la densidad disminuye (Brasil y Ferrerira, 1971; Wilkins y Horne, 1991; Berger, 2000; Goulart et al., 2003; Malan, 2010; Paulino, 2012), o se mantiene sin mayores cambios (Mello et al., 1976; Vital y Della Lucia 1987; Warren et al., 2009; Cassidy et al., 2013; Euftrade Junior et al., 2016). La relación entre estos parámetros está muy influenciada por los cambios que ocurren con la densidad de la madera a medida que se incrementa la edad de los árboles (Santana et al., 2012; Sette Jr, et al., 2012; Resquin et al., 2012; Meneses et al., 2015), y también con los cambios que ocurren en la velocidad de crecimiento, en particular por los turnos cortos de cosecha los cuales están asociados a la intensa competencia entre árboles. Malan y Honn, (1992) y Malan, (2010), determinaron que los árboles que tienen mayores tasas de crecimiento en diámetro (como los observados en los mayores espaciamientos) presentan un tipo de madera relativamente homogénea y de mayor densidad desde la medula a la corteza. Este tipo de árboles, a su vez, alcanzan los máximos valores de densidad en edades tempranas del crecimiento. Estos autores constataron que los árboles que crecen en espaciamientos más amplios comienzan precozmente a producir madera adulta con el consiguiente aumento de la densidad y mayor homogeneidad. Sette Jr. et al., (2012) argumentan que éste aumento de la densidad de la madera asociado a la madera adulta se debe a las alteraciones que ocurren en el meristemo cambial, resultado en células con paredes de mayor espesor y con menor proporción de vasos. Sin embargo, Kojima et al., (2009) determinaron que el crecimiento en diámetro en *E. grandis* no afecta la densidad del xilema, lo cual según Zobel y Jett (1995) es un comportamiento frecuente en especies de porosidad difusa, como son las especies de *Eucalyptus*.

La hipótesis establecida en este estudio fue que la producción de biomasa en cultivos forestales de eucalipto está condicionada por la especie y la densidad de plantación. A partir

de esta hipótesis, el objetivo general fue ensayar tres especies de eucalipto (*E. benthamii* Maiden & Cambage, *E. dunnii* Maiden y *E. grandis* Hill ex Maiden), a distintas densidades de plantación para determinar que combinación maximiza la producción de biomasa del fuste por hectárea durante un periodo de 57 meses. Los objetivos específicos fueron y i) ajustar ecuaciones de peso individual del fuste para cada sitio y especie a partir de parámetros dasométricos, ii) estudiar el efecto de la especie, densidad de plantación y edad sobre la densidad de la madera iii) medir la producción de biomasa para las especies de eucalipto ensayadas (*E. benthamii*, *E. dunnii* y *E. grandis*), en función de la densidad de plantación a lo largo del ciclo del cultivo en primera rotación.

2. Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio corresponde a dos ensayos instalados en predios de la empresa Forestal Oriental, en las zonas norte y litoral del Uruguay (32°13'30" latitud sur y 55°54'40" longitud oeste y 32°24'05" latitud sur y 57°31'02", Departamentos de Tacuarembó y Paysandú respectivamente). De acuerdo a la Comisión Nacional para el Estudio Agroeconómico de la Tierra (CO.NE.A.T.), los suelos correspondientes al grupo 7.32. (Tacuarembó) son de tipo Luvisoless y Acrisoles, con una horizonte A de 50–60 cm de profundidad, de textura areno-limosa, muy baja fertilidad, alto riesgo de erosión, pendientes moderadas (3–4%), estructura débil, bajo contenido de materia orgánica, drenaje imperfecto y buena capacidad de exploración por parte de las raíces. Los Suelos pertenecientes al grupo 9.3 (Paysandú), corresponden a Planosoles, con baja fertilidad, Horizonte A con 40 a 50 cm de profundidad, textura arenosa, estructura débil, bajo contenido de materia orgánica, pendientes de 2–3%, medio a bajo riesgo de sequía, drenaje imperfecto, permeabilidad moderada a lenta y buena capacidad de exploración de raíces (MGAP, 1976). El clima corresponde al tipo subtropical templado, con una temperatura media anual de 18 °C, y unas temperaturas medias de 12 °C y 24 °C para el mes más frío y más cálido, respectivamente. El rango medio de precipitación anual se ubica entre 1300 y 1400 litros m² (Castaño et al., 2011).

El área de estudio corresponde a dos ensayos instalados en predios de la empresa Forestal Oriental, en las zonas norte y litoral del Uruguay (32°13'30" latitud sur y 55°54'40" longitud oeste y 32°24'05" latitud sur y 57°31'02", Departamentos de Tacuarembó y Paysandú respectivamente). De acuerdo a la Comisión Nacional para el Estudio Agroeconómico de la Tierra (CO.NE.A.T.), los suelos correspondientes al grupo 7.32. (Tacuarembó) son de tipo Luvisoless y Acrisoles, con una horizonte A de 50–60 cm de profundidad, de textura areno-limosa, muy baja fertilidad, alto riesgo de erosión, pendientes moderadas (3–4%), estructura débil, bajo contenido de materia orgánica, drenaje imperfecto y buena capacidad de exploración por parte de las raíces. Los Suelos pertenecientes al grupo 9.3 (Paysandú), corresponden a Planosoles, con baja fertilidad, Horizonte A con 40 a 50 cm de profundidad, textura arenosa, estructura débil, bajo contenido de materia orgánica, pendientes de 2–3%, medio a bajo riesgo de sequía, drenaje imperfecto, permeabilidad moderada a lenta y buena capacidad de exploración de raíces (MGAP, 1976). El clima corresponde al tipo subtropical templado, con una temperatura media anual de 18 °C, y unas temperaturas medias de 12 °C

y 24 °C para el mes más frío y más cálido, respectivamente. El rango medio de precipitación anual se ubica entre 1300 y 1400 litros m² (Castaño et al., 2011).

Diseño experimental

El diseño experimental corresponde a un ensayo de parcelas divididas en bloques completos al azar con dos factores: especie (factor principal con tres niveles: *E. benthamii*, *E. dunnii* y *E. grandis*) y densidad de plantación (factor subordinado con cuatro niveles: 2220, 3330, 4440 y 6660 árboles ha⁻¹) y tres repeticiones, lo que corresponde a un total de 12 tratamientos y 36 parcelas (un total de 3600 árboles). El origen de la semilla fue Brasil (APS Pinhão-Estado de Paraná-Brasil) para *E. benthamii*, huerto semillero del INIA (2^a generación) para *E. grandis* y Undera (Moletton West Coffs Harbour, Australia) para *E. dunnii*. Los ensayos fueron instalados en los periodos comprendidos entre el 13 al 15 de octubre y del 27 de octubre al 1 de noviembre, ambos en el año 2010, en Tacuarembó y Paysandú, respectivamente. Las parcelas están compuestas por 6 líneas de plantación con 25 plantas de cada especie en cada una de ellas. Las distancias de plantación fueron de 3 m × 0.5 m, 3 m × 0.75 m, 3 m × 1 m y 3 m × 1.5 m, correspondientes a las densidades de 6660, 4440, 3330 y 2220 árboles ha⁻¹. Cada sitio tenía un total de 36 parcelas y 3600 plantas.

En Tacuarembó la preparación del suelo, previo a la plantación, consistió en un subsolado de 40 cm de profundidad y el paso posterior de una grada excéntrica. En el sitio de Paysandú se realizaron dos aplicaciones sucesivas de una grada excéntrica a 30 cm de profundidad más una acaballadora. La plantación se realizó manualmente y se aplicó una fertilización de asiento de 150 kg ha⁻¹ de 18/46/0 (N, P, K) y 180 kg ha⁻¹ de 14/30/12 (N, P, K) más 6% S, 0.2% B y 0.3% Zn, en los sitios de Tacuarembó y Paysandú, respectivamente.

Las superficies promedio de las parcelas fueron de 706, 468, 350 y 234 m² y las áreas evaluadas fueron 470, 314, 234 y 156 m² para las densidades de 2220, 3330, 4440 y 6660 árboles ha⁻¹, respectivamente. La superficie fue calculada como el producto del largo por el ancho de cada parcela usando un cinta métrica.

Muestreo de árboles y mediciones

En total se han realizado 6 inventarios: julio-octubre de 2011, mayo-agosto de 2012, enero de 2013, agosto-diciembre de 2014, julio-enero de 2015 y octubre-marzo de 2016. Las evaluaciones fueron realizadas en las 4 líneas centrales de cada bloque para evitar el efecto de borde. En cada una de las plantaciones se evaluó la supervivencia para cada uno de los años analizados. En cada una de las parcelas se midió el diámetro normal (dn , cm, a 130 cm de altura con una cinta diamétrica con una precisión de 0.1 cm) de los árboles de las cuatro filas centrales de la parcela (filas de la 2 a la 5), y la altura total de los árboles (h , m) con un hipsómetro Vertex IV (Haglof., Suecia) de las filas 2 y 4. La altura total de la planta se considera como la distancia que existe entre el cuello de la raíz y la base de la yema terminal de la planta. La h del resto de los arboles fue estimada a partir de ecuaciones ajustadas en función del diámetro normal (Anexo II. Ecuación de ajuste altura-diámetro). Fueron medidos los arboles con un dn mayor a 3 cm. En los inventarios de 2012, 2014, 2015 y 2016 se procedió al apeo de 3 a 5 árboles por parcela (especie × densidad de plantación), cuyos dn representaron a las clases diamétricas de mayor frecuencia relativa. Una vez apeados se midió la h y el dn , diámetro en la base (db , cm) a 0.7 metros, y a partir de ahí

cada metro hasta una altura correspondiente a un diámetro con corteza de 1 cm. Los árboles apeados fueron pesados con corteza en balanza marca Radwag con precisión de 1 g. A partir de la base, y a una altura correspondiente al 50 y al 75% de la altura total, se extrajeron dos discos de 2 cm de espesor los cuales fueron pesados con corteza en campo. Uno de los discos fue secado en estufa con ventilación y circulación forzada a $103\pm 2^\circ\text{C}$ marca Thermo Scientific hasta peso constante y con estos valores fue estimado el porcentaje de materia seca de cada disco. Con el valor de cada disco fue estimada la media ponderada de cada árbol teniendo en cuenta la superficie de los mismos

Densidad básica

Con las muestras extraídas en los inventarios de 2012, 2015 y 2016 se determinó la densidad básica de la madera (Db , g cm^{-3}). El segundo disco se mantuvo en agua para lograr su saturación completa. El volumen fue medido por desplazamiento de agua, y luego la muestra fue secada en estufa de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente. Para estimar la densidad de cada árbol se utilizó la siguiente fórmula (Santos, 2011) [Ecuación 1]:

$$Db = \frac{A_B Db_B + A_{50} Db_{50} + A_{75} Db_{75}}{A_B + A_{50} + A_{75}} \quad [1]$$

Donde Db es la densidad básica ponderada, D_B , D_{50} y D_{75} son los valores de densidad de cada disco y A_B , A_{50} , A_{75} las áreas transversales de los mismos para las alturas 0, 50 y 75% respectivamente.

Funciones de peso

A partir de muestreo destructivo en donde se obtuvieron 2592 datos (en los años 2012, 2014, 2015 y 2016) con los que se ajustaron las ecuaciones de peso asumiendo que los árboles de las mismas especies muestran semejanzas en la forma de crecimiento. Para estimar la biomasa total (Pt), se partió de una estimación a través de un modelo de biomasa individual (Pi). Para estimar el Pi de cada especie y densidad de plantación fueron obtenidas ecuaciones de regresión lineales (simples y múltiples) y no lineales (logarítmicas) en función del dn , h y el número de árboles por hectárea. Las variables que mostraron mayor relación con el Pi fueron: dn , h y $dn \cdot h$.

Peso individual, acumulado e incremento medio anual

Con los Pi estimados (kg) se obtuvo el peso medio de cada parcela cuyo valor multiplicado por el número de árboles (de acuerdo a la sobrevivencia e cada inventario) se utilizó para estimar el Pt ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$) de cada combinación especie por densidad de plantación. El Incremento Medio Anual (IMA) fue estimado con el valor acumulado del Pt para cada uno de los inventarios de acuerdo con la siguiente expresión (Ecuación 2):

$$IMA = \frac{P_t}{t_o - t_i} \quad [2]$$

Donde Pt es el peso por hectárea, t_o y t_i son las edades correspondientes a cada período de evaluación.

Análisis estadístico

Para el análisis de los datos fue realizado de acuerdo con un modelo de parcelas divididas en bloques completos al azar de acuerdo al modelo [ecuación 3]:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_j + \tau_i + \gamma_k + \tau\gamma_{ik} + \varepsilon_{ijk} \quad [3]$$

Donde Y_{ijk} es la variable medida en la especie i , densidad de plantación k , en el bloque j ; μ es la media general de todas las observaciones, τ_i es el efecto i de la especie, efecto fijo; γ_k es el efecto k de la densidad de plantación, efecto fijo; β_j es el efecto j del bloque; $\tau\gamma_{ik}$ es la interacción especie y densidad de plantación, efecto fijo; y ε_{ijk} es el error experimental asociado a cada observación, independiente y con una distribución normal de media 0 y varianza σ^2 .

Con los datos de sobrevivencia, Db , Pi y Pt fue realizado un análisis de varianza previa comprobación de la normalidad y homogeneidad de varianzas. La distribución normal de los mismos fue analizada mediante el test de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas mediante el test de Levene. En el caso en que fue requerida la transformación se utilizó el procedimiento Box-Cox. El efecto del factor especie se contrastó con el error definido como la interacción de este con el bloque mientras que los efectos de la densidad de plantación y de la interacción se contrastaron con el cuadrado medio del error. Los contrastes de medias fueron realizados mediante el test de Tukey con un p -valor de 0.05. El grado de ajuste de los modelos obtenidos analizó a través de los siguientes parámetros: ajustado (R_{adj}^2), la raíz del cuadrado medio del error (RCME) y el sesgo (E). Para la selección de los modelos se analizó en los residuos el cumplimiento de las condiciones de: homocedasticidad, normalidad y autocorrelación mediante los test de Breusch-Pagan, Shapiro-Wilk y Durbin-Watson, respectivamente. Todos los análisis fueron realizados en Rstudio versión 20.14.1 y Statistix10.

3. Resultados

Sobrevivencia

La evolución de la sobrevivencia en los dos sitios en cada uno de los inventarios realizados es presentada en la Tabla 1. El análisis de los datos detectó diferencias significativas entre especies en el último de los inventarios (Tabla 2). En ambos sitios los mayores valores de sobrevivencia fueron alcanzados con *E. benthamii* y *E. dunnii* (57%, 57% y 83%, 86% para los sitios de Tacuarembó y Paysandú, respectivamente). En cada sitio los niveles obtenidos para cada densidad de plantación fueron muy similares entre sí. Los valores alcanzados en el sitio de Tacuarembó fueron notoriamente inferiores comparado con Paysandú, con valores comprendidos entre el 30 y el 60% al final del período para todas las especies. El descenso en el número de árboles vivos en este sitio fue detectado a partir del primer año de crecimiento. La mayor sobrevivencia fue registrada en el sitio de Paysandú con valores entre 70 y 90% a los 76 meses de edad para todas las especies (Tabla 3). En todos los casos no se observa ninguna relación definida entre la mortalidad de árboles y la densidad de plantación.

Tabla 1. Evolución de la sobrevivencia (%) (\pm E.S.) de las especies y densidades de plantación en ambos sitios.

Tacuarembó		Edad (meses)					
Especie	Densidad Plantación (árboles ha ⁻¹)	12	22	38	46	57	75
<i>E. benthamii</i>	2220	79 (3.2)	77 (3.3)	69 (4.0)	60 (4.1)	60 (3.8)	60 (2.7)
	3330	78 (7.2)	76 (6.6)	70 (7.0)	61 (14.9)	61 (14.8)	52 (11.6)
	4440	74 (9.0)	71 (8.7)	65 (10.1)	65 (9.5)	65 (9.0)	55 (4.9)
	6660	82 (5.7)	80 (4.8)	76 (5.7)	75 (5.0)	73 (4.3)	61 (3.5)
<i>E. dunnii</i>	2220	69 (3.0)	67 (3.5)	62 (4.7)	62 (4.5)	60 (3.8)	57 (4.9)
	3330	61 (7.2)	60 (6.4)	57 (5.7)	56 (5.2)	55 (4.7)	53 (7.3)
	4440	71 (4.9)	68 (4.4)	63 (5.5)	63 (5.5)	62 (5.8)	59 (6.2)
	6660	79 (4.9)	76 (4.6)	71 (3.2)	69 (4.4)	67 (5.0)	62 (3.8)
<i>E. grandis</i>	2220	85 (2.6)	81 (3.4)	71 (2.6)	66 (2.0)	64 (2.0)	54 (3.5)
	3330	78 (11.6)	74 (10.6)	63 (8.1)	60 (7.0)	60 (7.0)	47 (4.4)
	4440	82 (4.0)	77 (2.2)	64 (1.0)	60 (1.7)	60 (2.0)	47 (4.5)
	6660	76 (6.4)	69 (5.2)	55 (2.5)	50 (2.9)	49 (2.6)	34 (4.7)

Tacuarembó		Edad (meses)					
Especie	Densidad Plantación (árboles ha ⁻¹)	8	18	38	49	57	76
<i>E. benthamii</i>	2220	90 (0.6)	89 (0.6)	87 (0.3)	87 (0.3)	85 (1.7)	84 (1.5)
	3330	92 (3.9)	91 (4.3)	90 (4.4)	90 (4.4)	88 (5.2)	87 (4.4)
	4440	85 (2.3)	85 (2.7)	83 (3.3)	83 (3.3)	80 (2.8)	80 (2.8)
	6660	93 (3.2)	91 (3.0)	87 (2.9)	87 (2.6)	82 (2.3)	80 (3.9)
<i>E. dunnii</i>	2220	89 (1.3)	87 (1.8)	86 (1.2)	86 (1.2)	85 (0.9)	85 (0.9)
	3330	96 (0.6)	94 (1.7)	94 (1.9)	93 (1.8)	92 (1.5)	92 (1.8)
	4440	91 (3.0)	91 (3.0)	89 (2.3)	89 (2.3)	86 (1.7)	86 (1.7)
	6660	89 (3.5)	89 (3.2)	85 (2.8)	85 (2.8)	81 (3.0)	81 (3.0)
<i>E. grandis</i>	2220	88 (0.9)	87 (0.9)	84 (1.8)	84 (1.8)	84 (1.5)	78 (1.0)
	3330	90 (1.9)	89 (2.2)	84 (1.5)	84 (1.5)	82 (1.5)	73 (2.0)
	4440	93 (2.5)	92 (2.5)	87 (2.9)	87 (2.9)	85 (3.8)	76 (3.4)
	6660	92 (1.7)	88 (1.7)	84 (1.9)	83 (1.8)	81 (1.7)	74 (1.5)

Tabla 2. Resultado del test de ANOVA para sobrevivencia de *Eucalyptus benthamii*, *E. dunnii* y *E. grandis* en sistema de corta rotación en Tacuarembó y Paysandú.

Tacuarembó	Edad (meses)											
	12		22		38		46		57		75	
Efectos	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor
Especie	3.13	0.061	2.45	0.108	2.07	0.148	0.95	0.397	1.08	0.354	5.74	0.009
Densidad de plantación	0.64	0.593	0.57	0.637	0.42	0.734	0.37	0.772	0.28	0.839	0.668	0.58
Especie×Densidad	0.69	0.653	1.019	0.437	1.32	0.287	1.19	0.344	1.10	0.387	1.27	0.304

Paysandú	Edad (meses)											
	8		18		38		49		57		76	
Efectos	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor
Especie	0.31	0.734	0.36	0.701	2.18	0.134	2.25	0.127	1.43	0.258	18.77	1.24e⁻⁰⁵
Densidad de plantación	1.13	0.356	1.18	0.337	1.56	0.225	1.60	0.214	2.84	0.058	2.74	0.065
Especie×Densidad	1.79	0.142	1.32	0.285	1.31	0.29	1.27	0.306	1.23	0.322	1.34	0.276

Tabla 3. Valores de sobrevivencia (%) para cada especie y densidad de plantación en Tacuarembó (76 meses) y Paysandú (75 meses). Letras diferentes indican diferencias significativas post-hoc entre especies y densidades de plantación mediante el test de Tukey con un nivel de probabilidad del 5%.

Sitio	Especie			Densidad de plantación (árboles ha ⁻¹)			
	<i>E. benthamii</i>	<i>E. dunnii</i>	<i>E. grandis</i>	2220	3330	4440	6660
Paysandú	82.8 a	86.0 a	75.2 b	82.6 a	83.9 a	80.7 a	78.2 a
Tacuarembó	56.8 a	57.4 a	45.6 b	56.6 a	50.3 a	53.8 a	52.3 a

Densidad de la madera

El análisis de la *Db* indica que en el sitio de Tacuarembó, se observó un efecto significativo de la especie en las tres evaluaciones pero no de la densidad de plantación (Tabla 4). En el sitio de Paysandú el efecto de la especie fue significativo en los tres períodos evaluados, mientras que la densidad de plantación sólo mostró un efecto significativo en la primera y en la última medición. En la última evaluación *E. dunnii* y *E. benthamii* tienen los valores más altos de *Db* en ambos sitios (Tabla 5). Los valores obtenidos en el sitio de Tacuarembó son sensiblemente más bajos que los del sitio de Paysandú aunque esto no fue comprobado mediante un análisis comparativo de los dos sitios. En este último caso, el contraste de medias mostró que los mayores valores de *Db* son obtenidos con las densidades menores de plantación. En cambio, en el sitio de Tacuarembó la densidad de plantación no tuvo un efecto evidente sobre la *Db*.

La evolución de la *Db* a lo largo de los inventarios muestra un comportamiento diferente en cada sitio (Tabla 6). En el sitio de Tacuarembó con *E. benthamii* y *E. dunnii* la *Db* se mantuvo sin mayores alteraciones en los tres inventarios y en las distintas densidades de plantación mientras que *E. grandis* se observó una leve disminución de la *Db* con el aumento de la edad. En el sitio de Paysandú se observó un incremento significativo de la *Db* para las densidades más bajas de plantación. Si bien se registró un incremento con las densidades más altas el mismo no fue detectado mediante el análisis de varianza. En los dos primeros inventarios la *Db* se mantuvo prácticamente sin cambios entre las densidades de plantación mientras que en el último con *E. dunnii* se observó un aumento de la *Db* en la densidad de plantación más baja. En este sitio la *Db* tuvo un incremento para todas las densidades de plantación entre los 57 y 76 meses alcanzando niveles de 9% 28%, con las densidades de 6660 y 2220 árboles ha⁻¹, respectivamente; con un incremento medio de 21%, 16% y 12% para *E. grandis*, *E. dunnii* y *E. benthamii*.

Tabla 4. Resultado del test de ANOVA para la *Db* de la especie y densidades de plantación en Tacuarembó y Paysandú en los tres inventarios. Los valores significativos están indicados en negrita.

	Tacuarembó						Paysandú					
	Edad (Meses)											
	18		57		76		22		57		75	
	<i>F</i>	<i>p</i> -valor	<i>F</i>	<i>p</i> -valor	<i>F</i>	<i>p</i> -valor	<i>F</i>	<i>p</i> -valor	<i>F</i>	<i>p</i> -valor	<i>F</i>	<i>p</i> -valor
Especie	52.9	<0.001	51.50	<0.001	32.09	<0.001	55.2	<0.001	117.9	<0.001	8.91	<0.001
Densidad plantación	0.22	0.882	1.15	0.331	0.82	0.481	3.80	0.011	0.12	0.947	5.00	0.03
Especie×Densidad	1.90	0.084	2.26	0.47	0.24	0.961	3.05	0.07	1.05	0.397	0.75	0.607

Ajuste de ecuaciones

Los modelos seleccionados de ajuste del P_i en función del diámetro normal y la altura total para cada especie, densidad de plantación y sitio son presentados en las Tablas 7 y 8. De los 192 modelos evaluados se seleccionaron (uno para cada sitio, especie y densidad de plantación) los que presentaron los menores valores de error (RCME), sesgo (E) y mayor valor de R^2_{ajd} . Los residuos de los modelos seleccionados cumplieron con los supuestos de normalidad, homocedasticidad e incorrelados.

Peso del fuste individual y por hectárea

El análisis de los datos de P_i en el último inventario mostró que existen diferencias significativas en ambos sitios entre especies solo en el sitio de Paysandú. El efecto de la densidad de plantación fue significativo en ambos sitios (Tabla 9). En el sitio de Tacuarembó también se detectó una interacción significativa entre ambos factores. Para el caso del *Pt* la densidad de plantación mostró tener un efecto significativo en ambos sitios. La interacción entre ambos factores fue significativa en ambos sitios (Tabla 9).

Tabla 5. Valores de Db para las especies y densidades de plantación en Tacuarembó (75 meses) y Paysandú (76 meses). Letras diferentes indican diferencias significativas a través del test de Tukey entre especies y densidades de plantación con un nivel de probabilidad del 5%.

Sitios	Especies			Densidad de plantación (árboles ha ⁻¹)			
	<i>E. benthamii</i>	<i>E. dunnii</i>	<i>E. grandis</i>	2220	3330	4440	6660
Tacuarembó	0.413 b	0.431 a	0.376 c	0.402	0.412	0.402	0.411
Paysandú	0.496 ab	0.539 a	0.458 b	0.544 a	0.504 ab	0.475 b	0.467 b

Tabla 6. Evolución de la $Db \pm (E.S)$ para cada especie y densidad de plantación en cada inventario de ambos sitios. Letras diferentes indican diferencias para cada densidad de plantación (en cada especie) entre los diferentes inventarios mediante el test de Tukey con un nivel de $p < 0.05$.

Especie	Densidad de plantación (árboles ha ⁻¹)	Tacuarembó			Paysandú		
		Meses					
		22	57	75	18	57	76
<i>E. benthamii</i>	2220	0.406 (0.01) a	0.409 (0.01) a	0.410 (0.01) a	0.422 (0.03) b	0.445 (0.01) ab	0.520 (0.01) a
	3330	0.400 (0.01) a	0.415 (0.01) a	0.413 (0.01) a	0.413 (0.03) b	0.447 (0.01) ab	0.509 (0.01) a
	4440	0.412 (0.01) a	0.405 (0.01) a	0.409 (0.01) a	0.427 (0.02) a	0.441 (0.01) a	0.467 (0.01) a
	6660	0.411 (0.01) a	0.423 (0.01) a	0.420 (0.01) a	0.429 (0.03) a	0.443 (0.01) a	0.487 (0.01) a
<i>E. dunnii</i>	2220	0.435 (0.01) a	0.445 (0.01) a	0.420 (0.01) a	0.475 (0.03) b	0.458 (0.01) b	0.610 (0.01) a
	3330	0.454 (0.01) a	0.428 (0.01) a	0.442 (0.01) a	0.464 (0.03) a	0.458 (0.01) a	0.522 (0.01) a
	4440	0.443 (0.01) a	0.417 (0.01) a	0.429 (0.01) a	0.461 (0.03) a	0.466 (0.01) a	0.510 (0.01) a
	6660	0.438 (0.01) a	0.417 (0.01) a	0.434 (0.01) a	0.456 (0.02) a	0.475 (0.01) a	0.513 (0.01) a
<i>E. grandis</i>	2220	0.410 (0.01) a	0.368 (0.01) b	0.376 (0.01) b	0.432 (0.03) a	0.379 (0.01) b	0.503 (0.02) a
	3330	0.395 (0.01) a	0.368 (0.01) a	0.381 (0.01) a	0.406 (0.03) b	0.389 (0.01) b	0.480 (0.01) a
	4440	0.395 (0.01) a	0.365 (0.01) b	0.369 (0.01) ab	0.373 (0.03) b	0.379 (0.01) b	0.446 (0.01) a
	6660	0.390 (0.01) a	0.345 (0.01) b	0.378 (0.01) a	0.399 (0.02) a	0.366 (0.01) a	0.402 (0.02) a

Tabla 7. Ajuste de modelos de P_i en función del dn y h para las especies y densidades de plantación en Tacuarembó.

Especie	Densidad de plantación (árboles ha ⁻¹)	Modelos	N	R_{adj}^2	RCME	E	F	p-valor
<i>E. benthamii</i>	2220	$LnP_i = -3.85133 + Ln(dbh) \times 1.60521 + 1.25189 \times Ln(h)$	43	0.993	0.0803	0.062	3243	< 2.2e-16
	3330	$LnP_i = -4.06731 + Ln(dbh) \times 1.69936 + 1.24073 \times Ln(h)$	43	0.995	0.0692	0.0548	4484	< 2.2e-16
	4440	$LnP_i = -4.0288 + Ln(dbh) \times 1.7815 + 1.1578 \times Ln(h)$	43	0.984	0.135	0.0644	1292	< 2.2e-16
	6660	$LnP_i = -3.9741 + Ln(dbh) \times 1.819 + 1.1045 \times Ln(h)$	43	0.991	0.103	0.0802	2483	< 2.2e-16
<i>E. dunnii</i>	2220	$LnP_i = -3.7866 + Ln(dbh) \times 1.8857 + 0.993 \times Ln(h)$	43	0.982	0.133	0.0921	1178	< 2.2e-16
	3330	$LnP_i = -3.54786 + Ln(dbh) \times 1.9381 + 0.85291 \times Ln(h)$	43	0.993	0.0789	0.0589	3266	< 2.2e-16
	4440	$LnP_i = -3.55077 + Ln(dbh) \times 1.76874 + 1.00589 \times Ln(h)$	43	0.994	0.0747	0.0589	3821	< 2.2e-16
	6660	$LnP_i = -3.57269 + 0.93233 \times Ln(dbh^2 \times h)$	43	0.991	0.0965	0.0740	4775	< 2.2e-16
<i>E. grandis</i>	2220	$LnP_i = -3.75887 + Ln(dbh) \times 2.06563 + 0.75153 \times Ln(h)$	43	0.996	0.0674	0.0573	5640	< 2.2e-16
	3330	$LnP_i = -3.8246 + Ln(dbh) \times 1.9724 + 0.8727 \times Ln(h)$	43	0.985	0.137	0.091	1332	< 2.2e-16
	4440	$LnP_i = -3.9033 + Ln(dbh) \times 1.5665 + 1.2751 \times Ln(h)$	43	0.988	0.123	0.085	1596	< 2.2e-16
	6660	$LnP_i = -3.7438 + Ln(dbh) \times 1.9417 + 0.8522 \times Ln(h)$	43	0.988	0.133	0.0869	1679	< 2.2e-16

N: número de observaciones

Tabla 8. Ajuste de modelos de P_i en función del dn y h para las especies y densidades de plantación en Paysandú.

Especie	Densidad de plantación (árboles ha ⁻¹)	Modelos	N	R_{adj}^2	REMC	E	F	p-valor
<i>E. benthamii</i>	2220	$LnP_i = -3.689 + 1.46708 \times Ln(dn^2)$	43	0.970	0.163	0.133	1349	< 0.001
	3330	$P_i = 12.2676836 - 1.5621963 \times (dn) + 0.022479 \times (dn^2 \times h) - 0.4340308 \times (h)$	43	0.992	3.887	0.0576	908.2	< 2.2e-16
	4440	$LnP_i = -2.87299 + 34.88771 \times Ln(dn) + 0.04097 \times Ln(dn^3) - 16.65596 \times Ln(dn^2 \times h) + 17.37619 \times Ln(h)$	42	0.985	0.111	0.0847	688.4	< 2.2e-16
	6660	$LnP_i = -3.80372 + 0.9709 \times Ln(dn^2 \times h)$	42	0.987	0.1206	0.0927	3173	< 2.2e-16
<i>E. dunnii</i>	2220	$LnP_i = -4.3231 + 0.2293 \times Ln(dn) + 0.9755 \times Ln(dn^2 \times h)$	43	0.973	0.1509	0.123	741.1	< 2.2e-16
	3330	$LnP_i = -3.8112 + 0.2207 \times Ln(dn) + 0.9119 \times Ln(dn^2 \times h)$	43	0.982	0.117	0.0874	1133	< 2.2e-16
	4440	$LnP_i = -3.85522 + 0.49256 \times Ln(dn) + 0.83519 \times Ln(dn^2 \times h)$	43	0.988	0.0935	0.0700	1745	< 2.2e-16
	6660	$LnP_i = -3.7724 + 0.9784 \times Ln(dn^2 \times h)$	43	0.984	0.130	0.0984	2660	< 2.2e-16
<i>E. grandis</i>	2220	$LnP_i = -3.5873 + 0.4278 \times Ln(dn) + 0.7862 \times Ln(dn^2 \times h)$	43	0.986	0.113	0.0902	1470	< 2.2e-16
	3330	$LnP_i = -4.3098 + 2.1701 \times Ln(dn) + 0.9201 \times Ln(h)$	42	0.984	0.127	0.105	1310	< 2.2e-16
	4440	$LnP_i = -4.19476 + 0.99516 \times Ln(dn^2 \times h)$	42	0.984	0.124	0.0974	2626	< 2.2e-16
	6660	$LnP_i = -3.6865 + 0.7172 \times Ln(dn) + 0.7057 \times Ln(dn^2 \times h)$	43	0.986	0.116	0.093	1451	< 2.2e-16

N: número de observaciones

Tabla 9. Resultados del test de ANOVA para el P_i y P_t de la especies y densidades de plantación en Tacuarembó (75 meses) y Paysandú (76 meses).

	Tacuarembó				Paysandú			
	P_i		P_t		P_i		P_t	
	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor
Densidad plantación	1.77	0.281	4.64	0.091	8.42	0.037	5.52	0.071
Especie	15.18	< 0.0001	15.91	< 0.001	64.94	< 0.0001	7.84	0.002
Especie x Densidad	3.37	0.020	2.75	0.044	2.57	0.056	4.14	0.009

Los resultados del análisis de la comparación de medias del Pi en el último inventario entre especies y densidades de plantación en ambos sitios se presentan en la Tabla 10. En el sitio de Tacuarembó, teniendo en cuenta la interacción entre ambos factores, se obtuvo que los mayores y menores Pi en general correspondieron para las tres especies en las densidades más bajas y más altas de plantación, respetivamente. En este sitio, el peso promedio del fuste fue mayor que en el de Paysandú debido a la menor sobrevivencia alcanzada. *E. dunnii* fue la especie con el mayor Pi (111.7 kg) a la menor densidad de plantación. En el sitio de Paysandú *E. grandis* fue la especie que alcanzó en promedio el Pi más alto (74 kg árbol⁻¹), al mismo tiempo que *E. benthamii* y *E. dunnii* tuvieron valores muy similares entre sí (55.9 y 63.3 kg árbol⁻¹, respectivamente). En cuanto al efecto de la densidad de plantación, se obtuvo una relación inversa entre el Pi y el número de árboles por hectárea. La relación entre ambos parámetros mostró una tendencia casi lineal en el sentido que la proporción entre la cantidad de árboles vivos (de cada densidad de plantación) fue muy similar a la obtenida con los respectivos pesos individuales.

Los valores del Pt mostraron niveles más altos en el sitio de Paysandú asociado a la mayor sobrevivencia alcanzada ya que, en promedio, el Pi fue menor que el registrado en el sitio de Tacuarembó. En este último sitio, en general, hay una estrecha relación entre el número de árboles vivos y la productividad por hectárea. En el sitio de Paysandú, se observó una relación menos definida entre la densidad de plantación y la productividad por hectárea en particular para *E. benthamii* y *E. dunnii*. Con estas dos especies el aumento del número de árboles no compensó la reducción del Pi como si sucede en mayor medida con *E. grandis*. *E. benthamii* fue la especie con el mayor valor de Pt en Tacuarembó (212.6 Mg ha⁻¹) mientras que en Paysandú se obtuvo con *E. grandis* (224.1 Mg ha⁻¹) a la mayor densidad de plantación.

La evolución del Pi en ambos sitios muestra que las diferencias entre densidades de plantación para las tres especies en general tienden a ser crecientes con el paso del tiempo. Ocurre una tendencia similar, aunque menos marcada, con el Pt . (Figuras 1 y 2). La evolución del IMA del Pt en el sitio de Tacuarembó presentan cierta estabilización a partir de los 57 meses de edad (Figura 3). En el sitio de Paysandú se observa un aumento creciente en todas las especies y densidades de plantación con el paso del tiempo hasta 75 meses de edad.

4. Discusión

En este estudio, fueron desarrolladas ecuaciones de biomasa del fuste de especies de eucaliptos específicas del sitio y fue evaluado el efecto de las especies y la densidad de siembra sobre la densidad de la madera y la biomasa individual y por hectárea durante un período des. Aunque los resultados muestran diferencias entre los dos sitios evaluados, nuestra investigación confirma la hipótesis de que las densidades de especies y densidades de plantación afectan la densidad de la madera y la productividad de la biomasa del fuste. Sin embargo, no fue verificada la hipótesis de que las especies y las densidades de plantación tienen algún efecto sobre el largo de rotación. La reducción del turno de cosecha en el sitio de Tacuarembó podría explicarse por una menor sobrevivencia. Los cultivos de

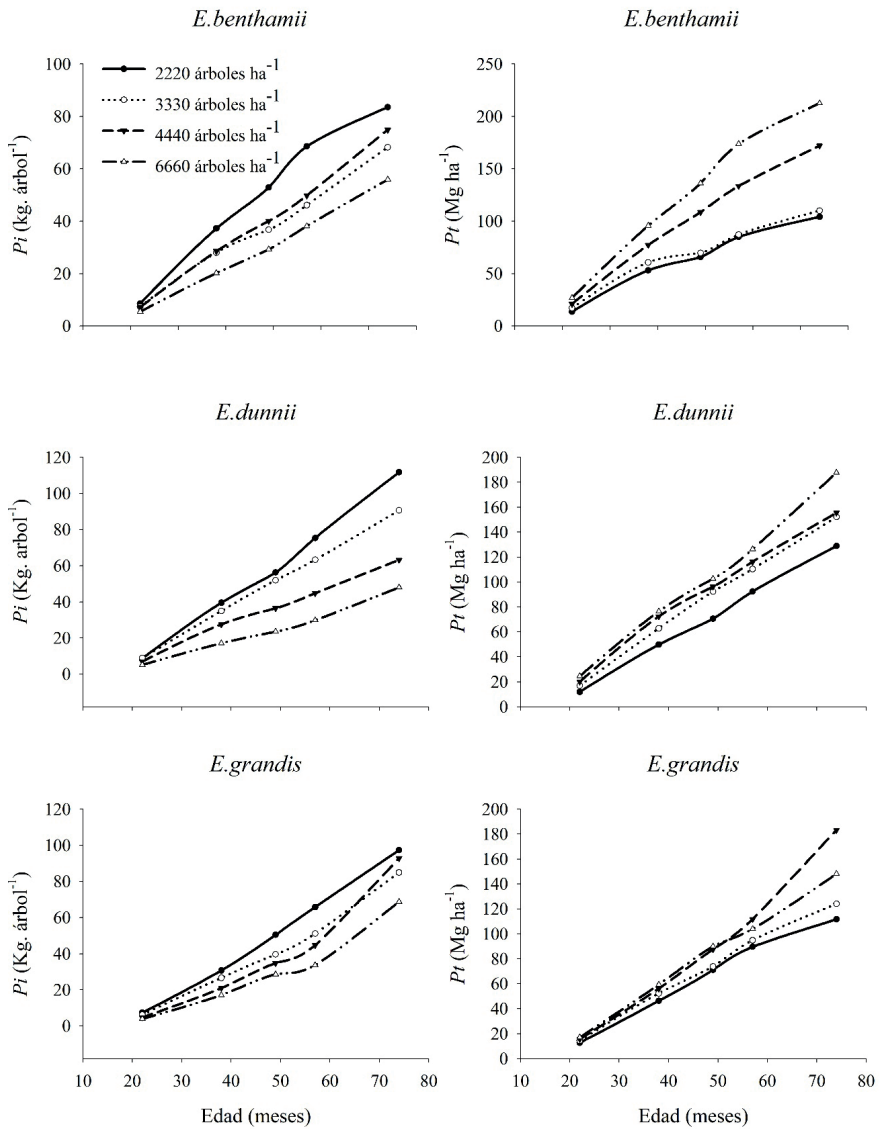


Figura 1. Evolución del P_i y P_t de las especies y densidades de plantación en Tacuarembó.

corta rotación con eucalipto en Uruguay mostraron una gran variación en la producción de madera del fuste en función del aumento de la densidad de plantación, especialmente en el sitio de Tacuarembó. *E. grandis* plantada a 6660 árboles ha⁻¹ fue la especie más productiva en Tacuarembó mientras que *E. dunnii*, obtuvo la mayor productividad en Paysandú

Tabla 10. Valores de *Pi* y *Pt* (\pm E.S.) para las especies y densidades de plantación en Tacuarembó (75 meses) y Paysandú (76 meses). Letras diferentes indican diferencias significativas post-hoc entre densidades de plantación (letras minúsculas) y especies (letras mayúsculas) mediante el test de Tukey con un nivel de probabilidad del 5 %. Letras en negrita indican diferencias debido a la interacción especie y densidad de plantación.

Especies	Densidad plantación (árboles ha ⁻¹)	Tacuarembó		Paysandú	
		<i>Pi</i> (kg árbol ⁻¹)	<i>Pt</i> (Mg ha ⁻¹)	<i>Pi</i> (kg árbol ⁻¹)	<i>Pt</i> (Mg ha ⁻¹)
<i>E. benthamii</i>	2220	83.5 (1.2) ab	104.2 (4.9) d	90.0 (16.8) ba	166.1 (27.9) ab
	3330	68.2 (5.5) ab	110.1 (19.9) d	64.7 (3.4) Bb	185.6 (4.5) ab
	4440	74.9 (8.9) ab	172.6 (3.4) abcd	35.2 (1.2) Bc	124.8 (5.7) b
	6660	55.9 (6.9) b	212.6 (18.2) a	33.6 (3.3) Bd	174.9 (8.0) ab
<i>E. dunnii</i>	2220	111.7 (12.0) a	130.3 (5.6) bcd	100.8 (5.0) AB a	187.7 (10.9) ab
	3330	90.7 (7.8) ab	153.3 (8.3) abcd	62.1 (3.9) AB b	188.6 (9.1) ab
	4440	63.2 (2.6) b	155.8 (11.6) abcd	53.0 (4.5) AB c	198.5 (17.3) ab
	6660	48.3 (1.1) b	186.5 (6.7) ab	37.1 (3.1) AB d	198.1 (8.7) ab
<i>E. grandis</i>	2220	97.3 (6.2) ab	111.2 (11.1) cd	93.9 (5.6) A a	159.3 (8.8) b
	3330	85.0 (3.5) ab	124.3 (9.1) bcd	97.9 (2.4) A b	233.0 (12.0) a
	4440	92.8 (17.8) ab	184.5 (25.4) abc	58.1 (6.6) A c	195.1 (11.3) ab
	6660	68.7 (7.9) ab	150.1 (3.3) abcd	46.1 (3.0) A d	224.1 (9.9) a

a una densidad de plantación de 4440 árboles ha⁻¹. Las tres especies incluidas en este análisis representan a la mayoría de las plantaciones de biomasa actuales y potenciales en Uruguay (Balmelli y Resquin, 2006). Los resultados de este estudio indican que es posible obtener altos niveles de productividad de madera en un tiempo relativamente corto, incluso con densidades de plantación no muy altas. Es esencial garantizar buenas condiciones de implantación para que el cultivo obtenga altos niveles de productividad a lo largo de las rotaciones.

Sobrevivencia

Si bien existe numerosa información que relaciona el efecto de la competencia entre árboles y la sobrevivencia de los mismos (Dickel et al., 2010; Larson et al., 2015; Van Gunst et al., 2016), en este caso no pudo ser verificada en los primeros 76 meses de crecimiento. Esto, por un lado, podría ser explicado por la tolerancia a la competencia que en general muestran las especies de eucaliptos (Jacobs, 1995; Tomé y Verwijst, 1996) y, por otro, deberse a que hasta el momento no están ocurriendo procesos severos de competencia por factores tales como la luz y el agua (Sale, 2005; Xue et al., 2011). De las especies evaluadas, *E. grandis* es la que registra los valores más bajos de supervivencia en el último inventario en los dos sitios, indicando una mayor susceptibilidad a la competencia entre individuos que la de las otras especies (Schönau y Coetzee, 1989). En el sitio de Tacuarembó se observó un importante descenso en el número de árboles vivos desde el inicio del período de evaluación mientras que en Paysandú, la supervivencia, en general, se mantuvo relativamente alta a lo largo de todo el período. En todos los casos el aumento en la mortalidad de los árboles no estuvo asociada a la densidad de plantación. La mayor tasa de mortalidad

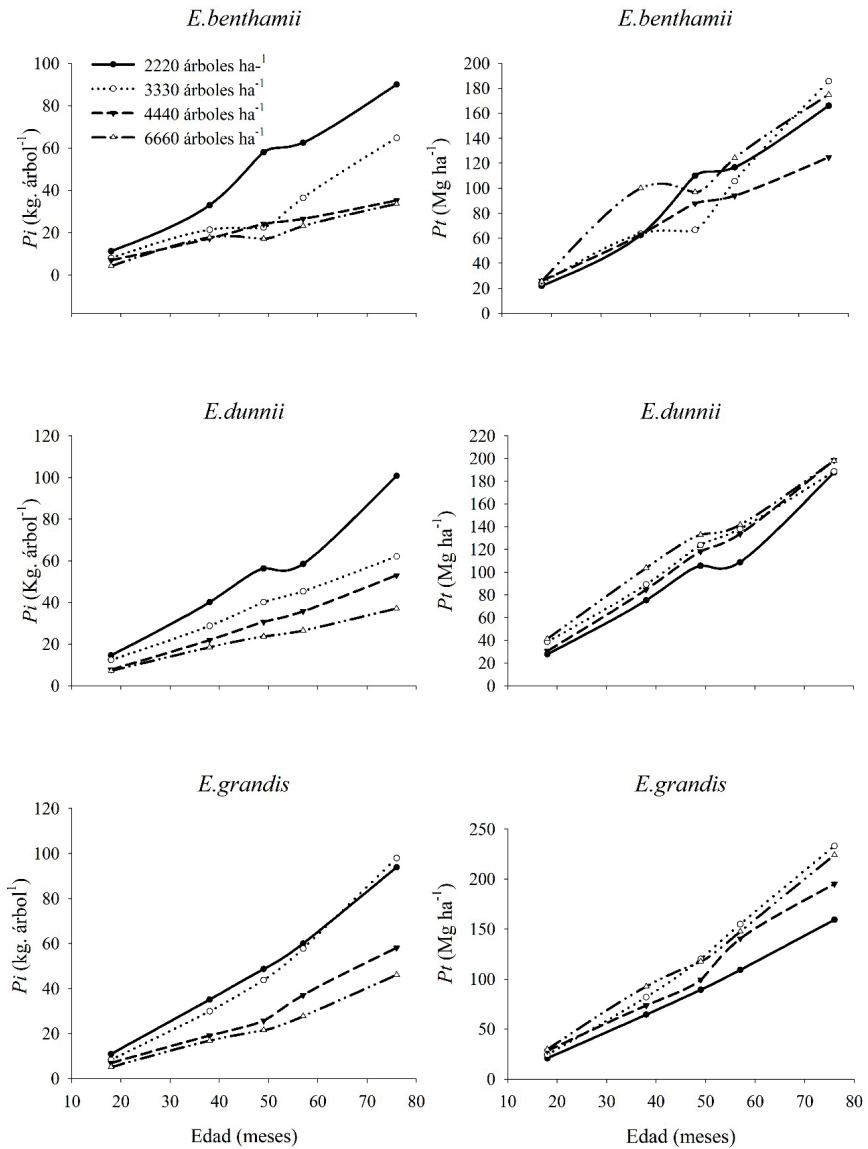


Figura 2. Evolución del P_i y P_t de las especies y densidades de plantación en Paysandú.

en Tacuarembó podría ser explicada por un deficiente control de malezas y preparación del suelo en las etapas posteriores a la plantación comparado con el sitio de Paysandú. Esto podría conducir a una mayor ocurrencia de árboles suprimidos los cuales tienen una mayor tasa de mortalidad con el correr del tiempo (Binkley et al. 2010; Cunningham et al. 2010). El

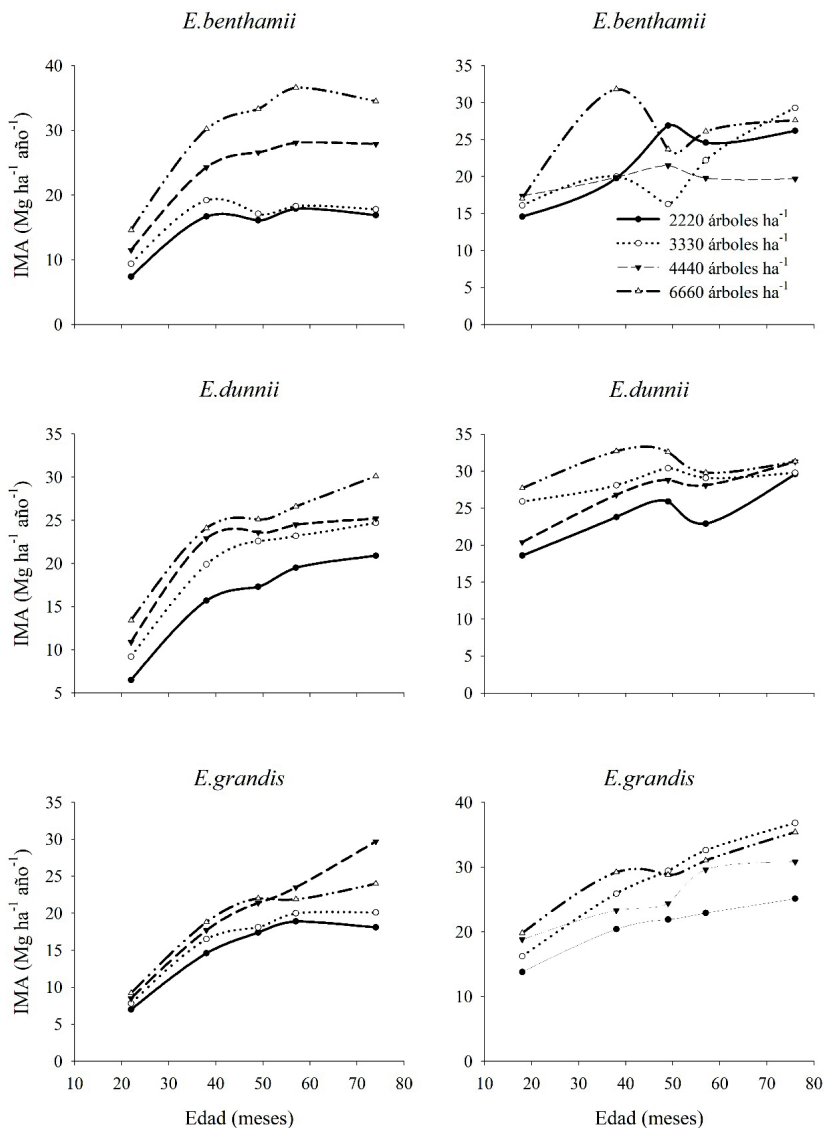


Figura 3. Evolución del IMA del Pt para las especies y densidades de plantación en los sitios de Tacuarembó (izquierda) y Paysandú (derecha).

régimen de precipitaciones de ambos sitios muestra que en los primeros dos años se registró un mayor nivel en Paysandú a pesar de que los mismos estuvieron por encima de los niveles medios históricos. Los valores de sobrevivencia obtenidos en el sitio de Tacuarembó muestra la importancia de una adecuada de las labores previas y posteriores a la plantación

en términos del control de malezas y el buen contacto entre el suelo y las raíces de la planta en las primeras etapas del cultivo.

Densidad de la madera

Los resultados obtenidos en el último inventario mostraron que en ambos sitios *E. dunnii* y *E. benthamii* son las especies que presentan los mayores valores de *Db*. Resultados similares fueron obtenidos por algunos autores en el sentido de que *E. grandis* tiene un valor relativamente bajo de *Db* comparado con otras especies de eucaliptos (de Mello y Fernández, 2000; Backman y García de León, 2003; Tuset et al., 2008). En el sitio de Paysandú se obtuvo una relación inversa entre la densidad de plantación y la *Db*, de modo que las densidades más altas se obtienen con los árboles de mayor crecimiento. Esto concuerda con lo determinado por algunos autores estudiando el efecto del espaciamiento en varias especies de eucalipto (Berger, 2000; Malan, 2010; Rocha et al., 2016; Lopes et al., 2017). Resultados de algunos trabajos indican que los árboles que alcanzan mayor tamaño tienen una mayor uniformidad de la *Db* en el sentido de la medula hasta la corteza (Cassidy et al., 2013). Por otro lado, Malan y Hoon (1992) evaluando *E. grandis* determinaron que árboles que crecen en mayores espaciamientos comienzan a producir madera adulta en forma precoz comparado con árboles creciendo en espaciamientos más reducidos. La madera adulta de los eucaliptos se caracteriza por tener fibras de mayor tamaño con paredes de mayor espesor que la madera juvenil (Pelozzi et al., 2012) lo cual está estrechamente relacionado con el incremento de la *Db* (Foelkel, 1978; Mimms et al., 1993). También se ha citado que los espaciamientos reducidos provocan que los árboles tengan una alta relación altura/diámetro resultando en una mayor proporción de madera juvenil (Larson et al., 2001). De acuerdo con estos autores, el crecimiento apical está asociado a la producción de leño inicial el cual está formado por fibras con menor espesor de pared y mayor proporción de vasos. El espaciamiento, a través de la competencia por luz entre individuos también tiene influencia en la capacidad de producción de fotoasimilados y, por tanto, de celulosa, la cual se almacena en la pared de las fibras (Souza et al., 2008) contribuyendo de forma directa al aumento de la *Db*.

Sin embargo, en el sitio de Tacuarembó no se observó este efecto entre las diferentes densidades de plantación, lo cual también es ampliamente reportado en la literatura (Vital y Della Lucia, 1987; Garlet, 1994; Zobel y Jett, 1995; Miranda et al., 2009). Las diferencias de los valores medios de *Db* entre ambos sitios ya han sido reportadas en estudios previos (Resquin et al., 2005) con valores más altos en el sitio de Paysandú. De los factores del ambiente que podrían estar explicando estas diferencias se ha determinado que la temperatura tiene un efecto directo sobre la anatomía de la madera y, por consiguiente, sobre la densidad de la misma (Thomas et al., 2004 y 2007). De acuerdo con estos autores, el aumento de la temperatura determina una reducción en el diámetro del lumen de los vasos y fibras al mismo tiempo que un incremento en el espesor de la pared de estas células en *E. grandis*. Estos autores, en un trabajo similar con *E. tereticornis*, establecieron que esos cambios ocurridos en la anatomía se deben a una reducción de la conductividad del agua por unidad de área de xilema frente a aumentos de la temperatura ambiente. Cabe destacar que la temperatura media del sitio de Paysandú ha sido en promedio 2°C superior a la registrada en el sitio de Tacuarembó en el periodo 2010-2016 (Figura 4) (INUMET, 2018).

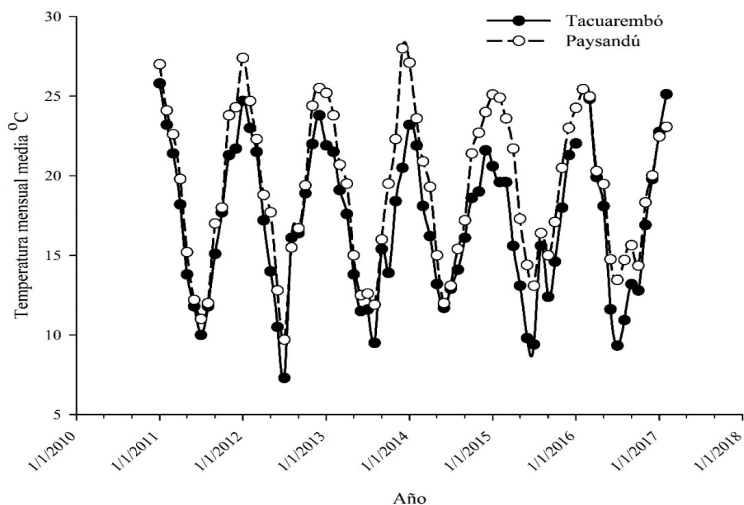


Figura 4. Evolución de la temperatura media mensual en los dos sitios para el período 2011-2017.

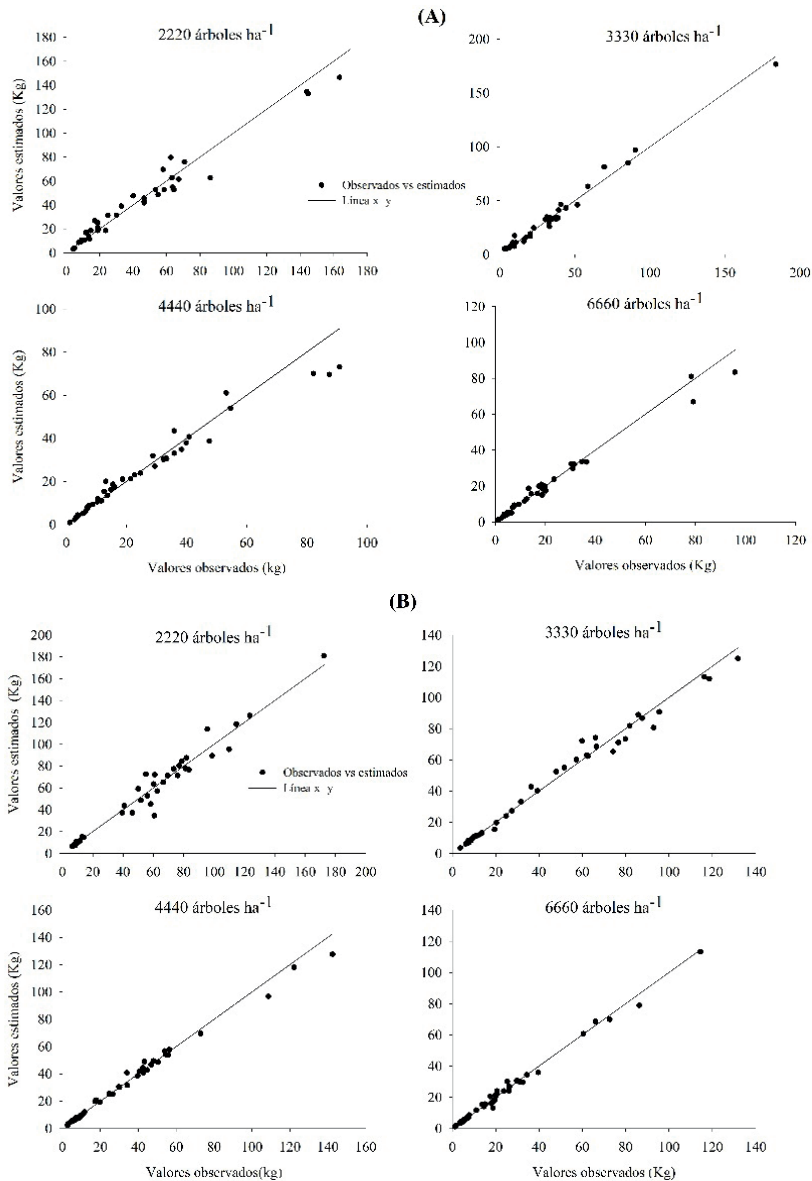
La evolución de la *Db* muestra que en el sitio de Paysandú ocurrió un incremento de esta variable con el aumento de la edad en particular para las menores densidades de plantación (Tabla 4). Los mayores aumentos se produjeron con *E. benthamii* y *E. dunnii* al pasar de 38 a 76 meses, con valores promedio para todas las densidades de plantación del 17% y del 16% entre ambos períodos, respectivamente; alcanzando valores del 23% y del 28% para la densidad de plantación de 2220 árboles por hectárea. Con *E. grandis* el incremento promedio fue del 13%. En todos los casos este cambio se produjo entre los 57 y 76 meses, ya que entre los 38 y 57 meses la *Db* se mantuvo prácticamente sin cambios. En los dos primeros inventarios (38 y 57 meses) la *Db* no tuvo mayores cambios en las diferentes densidades de plantación con las tres especies. En el último de los mismos se observa que las mayores *Db* se obtuvieron con los menores espaciamientos aunque esto solo fue detectado mediante el análisis de varianza en *E. grandis*. Los cambios registrados con el aumento de la edad podrían estar debidos al proceso de transición de la madera juvenil a adulta ocurrida en esas etapas del crecimiento de los árboles (Pelozzi et al., 2012). La proporción ocupada por la madera juvenil es altamente variable dependiendo de la posición en el fuste, material genético, tasa de crecimiento, pero ocupa un radio aproximado de 5 a 8 cm de radio en el entorno de la medula (Oliveira, 1997; Calonego et al., 2005). Este cambio en las propiedades de la madera está explicado por alteraciones en las características de los elementos del xilema que suceden con el transcurso del tiempo como un aumento del espesor de la pared de las fibras y una reducción de la frecuencias de los elementos de vaso (Sette Jr. et al., 2012). De acuerdo a Latorraca, (2000) la combinación del espaciamiento con la edad determina que el crecimiento en edades tempranas de árboles en espaciamientos amplios ocurre en condiciones de poca competencia relativa por luz. En estas condiciones se produce una alta tasa fotosintética y por lo tanto un leño inicial más denso que

en un espaciamiento más reducido. En el sitio de Tacuarembó, en cambio, prácticamente no se registraron cambios de la Db con el aumento de la edad ni con los diferentes espaciamientos en cada uno de los inventarios. El menor crecimiento alcanzado en general en este sitio podría estar asociado a la presencia mayoritaria en el fuste de madera juvenil en todo el período de crecimiento. Una tendencia similar fue reportada por Castro et al., (2016) evaluando clones de especies de *Eucalyptus* con cambios en la Db a partir de los 7 años de edad indicando los diferentes efectos de la edad en distintos materiales genéticos.

Selección de ecuaciones de estimación de Pi

Del análisis gráfico del Pi y diferentes variables regresoras se obtuvo que las de mejor comportamiento predictivo fueron las siguientes: dn , h y dn^2h . Estas variables son las utilizadas para explicar el Pi debido a que están directamente relacionadas con el tamaño del mismo (Picard et al., 2012). Las variables número de árboles por hectárea y edad no tuvieron una contribución significativa a la mejora de las estimaciones de peso no obstante ha sido utilizada con buenos resultados por algunos autores (Assis, 2012; Winck et al., 2015). El ajuste de los modelos fue realizado para cada sitio, especie y densidad de plantación ya que fueron obtenidas estimaciones de Pi más precisas que con los modelos para cada especie. Para casi todos los casos los modelos de mejor ajuste fueron los lineales alométricos del tipo: $LnPi = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(X)$, donde β_0 y β_1 son los coeficientes de regresión; $Ln(X)$ el logaritmo de las variables independientes que en este caso fueron: dn , h y dn^2h . A pesar de que el dn y la h son variables altamente relacionadas entre sí la inclusión de esta última mejoró las estimaciones del Pi (Antonio et al., 2007; González-García et al., 2013). De acuerdo con Jokela et al., (1986), Mello y Gonçalves, (2008) la altura no siempre realiza un aporte significativo en la estimación del peso dada la relación que presenta con el diámetro normal sin embargo esto no fue verificado en esta evaluación. A su vez algunos autores reportan que es posible obtener altos grados de ajuste con ecuaciones basadas sólo en el dn (Verwijst y Telenius, 1999; Ter-Mikaelian y Korzukhin, 1997; Kuyah et al., 2013; Bi et al., 2015). Resultados contrapuestos fueron obtenidos por García-BillaVrille et al., (2013) que indican que los modelos en función del dn tienen mayor sesgo resultando en peores resultados que los que utilizan ambas variables. Senelwa y Sims, (1998) determinaron que la variable combinada $dn^2 \times h$ es el mejor predictor del Pi , y que la altura se torna importante cuando se consideran una serie de años. Este tipo de modelos son los usados con mayor frecuencia, ya que combinan simplicidad y alta capacidad de ajuste al mismo tiempo que tienen ventajas en conjunto de datos con una alta variabilidad (Garcinuño, 1995). Sin embargo, algunos autores afirman que este tipo de modelos logarítmicos tiende a subestimar el valor de biomasa con respecto a los valores observados (Cunia, 1964; Cailliez, 1980). Los modelos ajustados en este estudio explican al menos un 97% (R^2_{adj}) de la variación observada en los Pi con errores muy próximos a cero ($RCME$ y E) en la casi totalidad de los casos (Tablas 7 y 8). Estos altos niveles de precisión son frecuentemente obtenidos con la fracción madera de especies de eucaliptos (Balboa Murias 2005; Winck et al., 2015; Mello y Gonçalves, 2008; González-García et al., 2013; Vega-Nieva et al., 2015). Los modelos ajustados en el sitio de Paysandú muestran cierta tendencia a subestimar los valores de Pi para los árboles de mayor tamaño en particular con *E. benthamii* a la densidad de plantación de 4440 árboles por hectárea (Figura 5). De todos modos, en todos los casos fue verificada la homocedasticidad de los residuos mediante el test de Breush-Pagan. En cambio,

en el sitio de Tacuarembó no se observa ese sesgo, mostrando que en este sitio los modelos seleccionados tienen una mayor precisión en la estimación del P_i (Figura 6). El ajuste de los modelos, en general, fue muy similar en ambos sitios con una ligera superioridad en el último de los mencionados.



(Figura 5, continúa en la página siguiente)

(Figura 5, continúa de la página anterior)

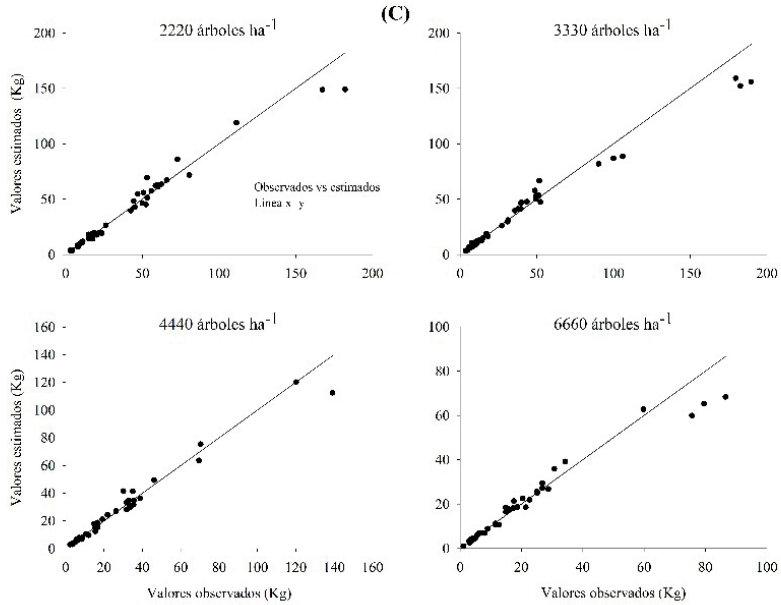
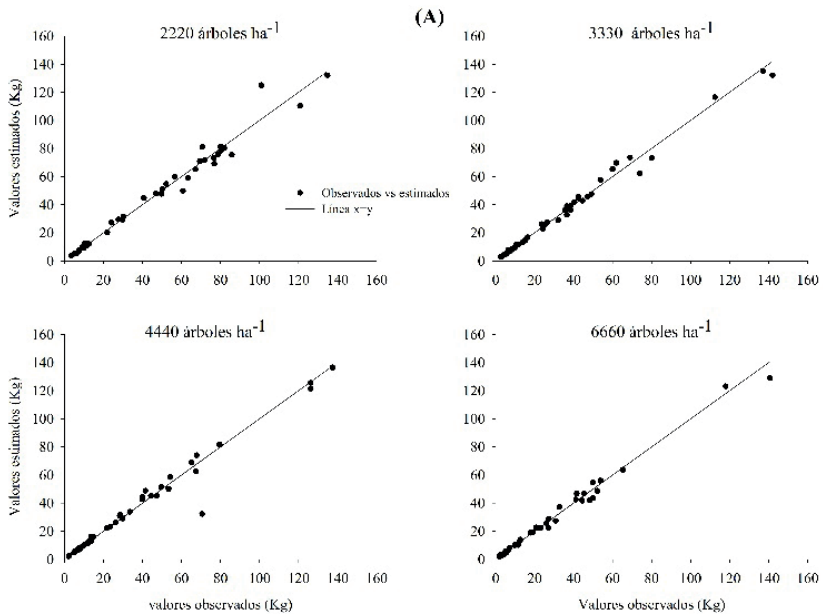


Figura 5. Relación entre los valores observados y estimados del Pi de *E. benthamii* (A), *E. dunnii* (B) y *E. grandis* (C) en Paysandú. En todas las Figuras ha sido ajustada la línea 1:1.



(Figura 6, continúa en la página siguiente)

(Figura 6, continúa de la página anterior)

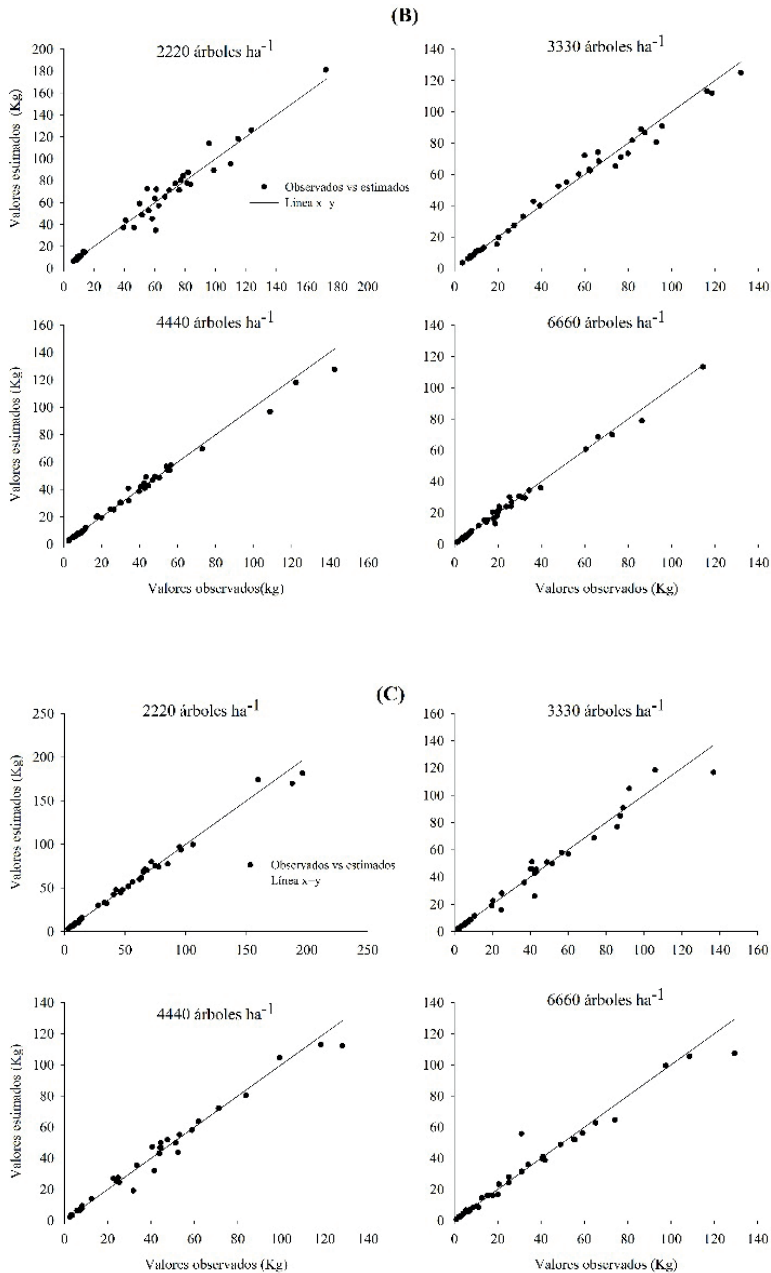


Figura 6. Relación entre los valores observados y estimados del P_i de *E. benthamii* (A), *E. dunnii* (B) y *E. grandis* (C) en Tacuarembó. En todas las Figuras ha sido ajustada la línea 1:1.

Peso del fuste individual y por hectárea e IMA

Los resultados del *Pi* obtenidos en Paysandú muestran que *E. grandis* es la especie que alcanza en promedio el valor más alto, mientras que *E. benthamii* y *E. dunnii* tienen valores inferiores y muy similares entre sí. En términos generales ocurre que el *Pi* es determinado por el volumen y la *Db*. En este caso el *Pi* registrado con *E. grandis* está explicado por el crecimiento individual ya que la *Db* de esta especie es la más baja de las tres evaluadas. El *Pi* de esta especie, por tanto, estaría asociado al mayor crecimiento individual que a su vez, está explicado por la menor sobrevivencia en promedio alcanzada (75%) y por consiguiente a una menor competencia entre individuos en relación con lo registrado con *E. benthamii* y *E. dunnii* (83 y 86%, respectivamente). En cuanto al efecto de la densidad de plantación, se obtuvo una evidente relación negativa entre el espaciamiento y el *Pi*. La reducción del peso promedio para las tres especies al pasar de 2220 a 6660 árboles por hectárea fue del 58%. Esta es una tendencia ampliamente citada en la literatura con especies de eucaliptos y con densidades de plantación similares a las evaluadas en este caso (Vital y Della Lucia, 1987; Müller, 2005; Paulino, 2012; Eufrede Jr. et al., 2016; Hakamada et al., 2017). Considerando las densidades de plantación extremas en promedio para las tres especies, se observa que la relación entre el número de árboles vivos (5137 vs. 1802 árboles ha⁻¹) es similar a la relación de los pesos individuales promedio (94.9 vs. 38.9 kg árbol⁻¹). Este comportamiento del peso es muy similar al registrado con el volumen individual (0.140 vs. 0.059 m³ árbol⁻¹), lo cual indica la alta relación entre ambos parámetros. Resultados similares fueron obtenidos por Leles et al. (2001) evaluando *E. camaldulensis* y *E. pellita* a los 52 meses con densidades de plantación de 2220 y 3330 árboles por hectárea. En el sitio de Tacuarembó, en cambio, el *Pi* depende del efecto combinado de la especie y densidad de plantación. Los mayores pesos son alcanzados con las densidades de plantación más bajas de manera similar para las tres especies. Al igual que en el sitio anterior, la *Db* tampoco explica el comportamiento observado con el *Pi* en relación con el espaciamiento. Los valores medios alcanzados para las especies y densidades de plantación son mayores que en el sitio de Paysandú, probablemente explicados por la mayor competencia ocurrida en este último sitio asociada a la mayor sobrevivencia registrada (84 vs. 61%, para Paysandú y Tacuarembó, respectivamente). En ese caso, la reducción del peso promedio para las tres especies fue del 40% con las densidades de plantación extremas (97.5 y 57.6 kg árbol⁻¹ con las densidades 2220 vs. 6660 árboles por hectárea, respectivamente). De acuerdo a Santos et al., (2017) el aumento del espaciamiento determina el mayor crecimiento de los árboles, aumentando la frecuencia de árboles dominantes y sin alterar la *Db* por encima de los 3330 árboles por hectárea. Esta mayor similitud de los pesos comparada con la del sitio de Paysandú podría ser atribuida a la estabilidad de la *Db* en los diferentes espaciamientos de manera que las diferencias del peso pueden ser atribuidas básicamente a los cambios ocurridos en el volumen.

En relación con el *Pt*, en el sitio de Paysandú la tendencia muestra que, en general, los mayores valores se obtuvieron con las densidades de plantación más altas. Esto es más evidente con *E. benthamii* y *E. grandis*, ya que con *E. dunnii* se obtuvo un comportamiento relativamente estable en las diferentes densidades de plantación. Esto último es un aspecto relevante ya que sería posible obtener altos rendimientos con bajas densidades de plantación lo que sería una ventaja en términos de la economía de los recursos utilizados (Berger, 2000) así como de la extracción de nutrientes (Bentancor et al., 2019). La respuesta

del peso, en este sitio, en los diferentes espaciamientos es menos evidente que los cambios detectados con el volumen (datos sin publicar). Esto está relacionado a la reducción observada en la *Db* de la madera en los espaciamientos más reducidos, lo que determina que no se detecten importantes diferencias en el *Pt* entre las diferentes densidades de plantación. En promedio para todas las especies el incremento en la productividad de 6660 vs. 2220 árboles por hectárea es próximo al 18% (199 vs. 171 Mg ha⁻¹, respectivamente). En el sitio de Tacuarembó se observó una tendencia similar, en el sentido que el mayor *Pt* se obtuvo con las densidades de plantación más altas, pero con diferencias más marcadas entre las mismas. En este caso las diferencias en el *Pi* entre espaciamientos tuvieron un menor efecto sobre el *Pt* y el mismo fue compensado en mayor proporción por el incremento en el número de árboles. El menor rendimiento en este sitio está explicado por la baja sobrevivencia registrada al final del período de evaluación. En este caso la diferencia entre densidades de plantación fue del 59% (183 vs. 115 Mg ha⁻¹ con 6660 y 2220 árboles por hectárea, respectivamente). Las tres especies alcanzaron niveles de *Pt* promedio muy similares entre sí. En términos generales, estos resultados son coincidentes con lo reportado en la literatura en cuanto a que la mayor productividad se obtiene con altas densidades de plantación (Goulart et al., 2003; Rocha, 2011; Navarro et al., 2016) ya que el número de árboles tiene mayor efecto que las eventuales alteraciones que puedan ocurrir con la *Db* (Malan, 2010; Eloy et al., 2014). Los espaciamientos reducidos determinan una mayor distribución de biomasa en el fuste mientras que los espaciamientos más amplios contribuyen al mayor desarrollo de la copa (Eufrade Junior et al., 2016). La tendencia, en todos los casos, muestra que las diferencias de productividad son cada vez mayores con el paso del tiempo (tanto en el *Pi* como en el *Pt*) no detectándose efectos visibles de la competencia entre individuos aun en las densidades de plantación más altas.

Los valores de IMA para el sitio de Paysandú en general muestran incrementos crecientes con niveles similares en *E. benthamii* y *E. dunnii* hacia el final de evaluación. Esto indicaría que en este sitio hasta los 76 meses no se ha alcanzado el turno de corta, lo que podría estar explicado por el alto nivel de sobrevivencia en promedio alcanzado (84%). Los valores más altos en promedio son obtenidos con *E. grandis*, seguido de *E. dunnii* y *E. benthamii* (32, 30.5 y 25 Mg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente). El IMA registrado en el sitio de Tacuarembó muestra un comportamiento diferente para las tres especies, y en promedio con valores inferiores a los del sitio anterior basado en los menores niveles de productividad. *E. benthamii* muestra un incremento de este parámetro hasta el mes 57 a partir del cual se produce un estancamiento de manera similar para todas las densidades de plantación. Para *E. dunnii* y *E. grandis* hasta ese momento se produce un incremento creciente, y a partir del mismo una reducción en el incremento para la mayoría de las densidades de plantación. Este comportamiento ocurrido a partir de los 57 meses puede estar explicado por la progresiva reducción en el número de árboles vivos. En promedio la mayor tasa de crecimiento es obtenida con *E. benthamii* y *E. dunnii* (24.3 y 25.3 Mg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente). En este sitio ocurre una relación más estrecha entre la densidad de plantación y el valor de IMA obteniéndose las productividades más altas con las mayores densidades de plantación.

5. Conclusiones

La sobrevivencia fue en el sitio de Paysandú fue relativamente alta a lo largo de todo el período mientras que en el sitio de Tacuarembó ocurrió una importante mortalidad de árboles desde las primeras etapas del crecimiento. La mayor sobrevivencia se obtuvo con *E. benthamii* y *E. dunnii*, y la mortalidad de árboles en estas especies no se vio afectada por el espaciamiento. En *E. grandis* se detectó una relación más estrecha entre la sobrevivencia y la densidad de plantación, aunque esto no fue confirmado por el análisis estadístico. Los valores más altos de *Db* fueron registrados con *E. dunnii* y *E. benthamii*, y, en particular, en el sitio de Paysandú. En este sitio, la *Db* estuvo negativamente relacionada con la densidad de la plantación, mientras que en el sitio de Tacuarembó no se vio afectada por esa variable. La evolución de la *Db* en el sitio de Paysandú mostró un incremento con la edad (de forma más evidente en las menores densidades de plantación) y con el aumento del espaciamiento, aunque esto último sólo fue detectado en *E. dunnii*. En el sitio de Tacuarembó la *Db* se mantuvo prácticamente sin cambios en los diferentes inventarios y densidades de plantación. Las ecuaciones de estimación de *Pi* lograron un alto grado de ajuste en función de la altura y del diámetro normal con funciones de tipo logarítmico en casi todos los casos. Los valores más altos del fuste individual fueron obtenidos con *E. grandis* en ambos sitios, y con las tres especies se observó una relación negativa de este parámetro con la densidad de plantación. En el sitio de Paysandú se alcanzan los niveles más altos de *Pt* debido a la mayor sobrevivencia registrada en el mismo. En este caso no se detecta una clara relación entre el *Pt* y densidad de plantación, destacando *E. grandis* con la productividad más alta. En el sitio de Tacuarembó se observó una relación más definida entre la densidad de plantación y la productividad de modo que los valores más altos de *Pt* se obtuvieron con los espaciamientos más reducidos. En este caso, *E. dunnii* fue la especie de mayor productividad. En la mayoría de los casos sucede que la brecha en la productividad individual como por hectárea de las diferentes densidades de plantación es cada vez mayor con el paso del tiempo. En ambos sitios el *Pt* depende del efecto combinado de la especie y la densidad de plantación. El IMA del sitio de Paysandú indicaría que hasta los 76 meses no se ha alcanzado el turno de corta en todos los casos mientras que en el sitio de Tacuarembó ocurrió un estancamiento de esta variable a partir de los 57 meses. Esto determinaría un acortamiento del ciclo del cultivo explicado por la importante mortalidad de árboles.

Referencias

- Antonio, N., M. Tomé, J. Tomé, P. Soares, L. Fontes. (2007). Effect of Tree, Stand, and Site Variables on the Allometry of *Eucalyptus globulus* Tree Biomass. *Can. J. For. Res.*, 37: 895–906. <https://doi.org/10.1139/X06-276>.
- Assis, M.R. (2012). *Modelagem Da Biomassa Seca e Estoque de Carbono Total Em Eucalyptus Considerando Diferentes Estágios Iniciais de Crescimento*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais. Brasil. 197 p.

- Backman, M.E., J. García de León. (2003). Correlations of Pulp and Paper Properties at an Early Age and Full. In *EUCEPA Conference: Sustainable Development for the Pulp and Paper Industry*, edited by Tecnicelpa, 108–112. Lisbon-Portugal.
- Balboa Murias, M.A. (2005). Biomasa Arbórea y Estabilidad Nutricional de Los Sistemas Forestales de *Pinus pinaster* Ait., *Eucalyptus globulus* Labill. y *Quercus robur* L. En Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. Lugo, España. 256.p.
- Balloni, E.A., J.W. Simões. (1980). O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais. *IPEF - Série Técnica*, 1(3): 1–16.
- Balmelli, G., F. Resquin. (2006). Productividad de Diferentes Especies de *Eucalyptus* Sobre Areniscas de Tacuarembó-Rivera. *Serie Técnica* 159. *INIA Tacuarembó*, 159: 305–312.
- Balmelli, G., F. Resquin. (2004). Evaluación Del Crecimiento de Especies de *Eucalyptus* En Diferentes Zonas de Prioridad Forestal. *Serie Aftercare Forestal INIA - JICA*, 14: 20.
- Bensaid, S., R. Conti, D. Fino. (2012). Direct Liquefaction of Ligno-Cellulosic Residues for Liquid Fuel Production. *Fuel*, 94. Elsevier Ltd: 324–32. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.11.053>.
- Bentancor, L., J. Hernández, A. Califra, F. Resquin, P. González-Barrios. (2019). Biomass and Bioenergy Evaluation of the biomass production, energy yield and nutrient removal of *Eucalyptus dunnii* Maiden grown in short rotation coppice under two initial planting densities and harvest systems, *Biomass and Bioenergy*. Elsevier Ltd, 122(January), pp. 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.019>.
- Berger, R. (2000). Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* Smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. RS, Brasil. 126 p.
- Bi, H., S. Murphy, L. Volkova, C. Weston, T. Fairman, Y. Li, R. Law, J. Norris, X. Lei, G. Caccamo. (2015). Additive Biomass Equations Based on Complete Weighing of Sample Trees for Open Eucalypt Forest Species in South-Eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 349. Elsevier B.V.: 106–21. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.007>.
- Binkley, D., Stape, J.L., Ryan, M.G., Barnard, H.R., Fownes, J. 2002. Age-related Decline in Forest Ecosystem Growth: An Individual-Tree, Stand-Structure Hypothesis. *Ecosystems*, 5, 58–67. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0055-7>
- Brasil, M.A.M., M. Ferreira. (1971). Variação Da Densidade Básica Da Madeira de *Eucalyptus alba* Reinw, *E. saligna* Smith e *E. grandis* Hill Ex-Maiden Aos 5 Anos de Idade, Em Função Do Local e Do Espaçamento. *Ipef* 2/3 (2/3): 129–49.
- Cailliez, F. (1980). estimacion del volumen forestal y prediccion del rendimiento con referencia especial a los trópicos. vol. 1 - estimacion del estimación volumen. Ccentre technique forestier tropical, Francia. Estudio FAO: MONTES 22/1. Organizacion de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentacion. Roma 1980. 100 p.
- Calonego, F. Wi., E.T.D. Severo, P.P. Assi. (2005). Mensuração Do Comprimento Das Fibras Para a Determinação Da Madeira Juvenil Em *Eucalyptus citriodora*. *Scientia Forestalis* 68: 113–21.
- Cassidy, M., G. Palmer, R.G.B. Smith. (2013). The Effect of Wide Initial Spacing on Wood Properties in Plantation Grown *Eucalyptus pilularis*. *New Forests*, 44(6): 919–36. <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9385-5>.

- Castaño, J.P., A. Ceroni, M. Furest, J. Aunchayna, R. Bidegain. (2011). Caracterización Agroclimática Del Uruguay 1980-2009. *Serie Técnica INIA*. 193. Montevideo, Uruguay. 33.
- Castro, A.F.N.M., R.V.O. Castro, A.D.C. Oliveira, R.C. dos Santos, A.M.M.L. Carvalho, P.F. Trugilho, I.C.N.A. de Melo. (2016). Correlations between Age, Wood Quality and Charcoal Quality of *Eucalyptus* Clones. *Árvore*, 40(3): 551–60.
- Cunia, T. (1964). Weighted Least Squares and Construction of Volume Tables. *Forest Science*, 10(2): 180–91.
- Cunningham, S.C., Thomson, J.R., Read, J., Baker, P.J., Nally, R.M. 2010. Does stand structure influence susceptibility of eucalypt flood plain forests to dieback? *Austral Ecol.* 35, 348–356. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2009.02043.x>.
- de Mello, J.C., R. Fernandez. (2000). Aptitud Papelera En 4 Especies de *Eucalyptus* (*E. grandis* W. Hill Ex Maiden, *E. dunnii*, *E. viminalis* Labillardière y *E. badijensis* Beuzev & Welch). Tesis Ing. Agr. Universidad de la Republica Oriental del Uruguay. Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay.
- Debell, D.S., Ch.R. Keyes, B.L. Gartner. (2001). Wood Density of *Eucalyptus Saligna* Grown in Hawaiian Plantations: Effects of Silvicultural Practices and Relation to Growth Rate. *Australian Forestry*, 64(December 2014): 106–10. <https://doi.org/10.1080/00049158.2001.10676173>.
- Dickel, M., H. Kotze, K. von Gadow, W. Zucchini. (2010). Growth and Survival of *Eucalyptus grandis* - a Study Based on Modelling Lifetime Distributions. *Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences (MCFNS)* 2(2): 86-96 (11). <http://mcfns.com/index.php/Journal/article/view/MCFNS.2-86>.
- Eloy, E., B.O. Caron, D.A. da Silva, D. Schmidt, R. Trevisan, A. Behling, E.F. Elli. (2014). Influência Do Espaçamento Nas Características Energéticas De Espécies Arbóreas Em Plantios De Curta Rotação. *Revista Arvore*, 38: 551–59. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300018>.
- Eufrade Junior, H., R.X. De Melo, M.M. Pereira Sartori, S.P.S Guerra, A.W. Ballarin. (2016). Sustainable Use of Eucalypt Biomass Grown on Short Rotation Coppice for Bioenergy. *Biomass and Bioenergy* 90: 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.03.037>.
- Foelkel, Celso. (1978). Madeira de Eucalipto: Da Floresta Ao Digestor. http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/Madeira%20do%20eucalipto_%20da%20floresta%20ao%20digestor.pdf 27 p.
- García-Villabrille, J.D., F. Crecente-Campo, C. Pérez-Cruzado, R. Rodríguez-Soalleiro, U. Diéguez-Aranda, A. Rojo-Alboreca. (2015). Biomass and Carbon Content in Galicia (NW Spain) *Eucalyptus globulus* Labill. *Stands. Recursos Rurais* 10: 45–52.
- Garcinuño, J. (1995). Biomasa aérea en plantaciones jóvenes de *Eucalyptus globulus* (Lab) en la costa de Valdivia, Xª región. Tesis Ing. Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 1995, 76 p.
- Garlet, NV. (1994). Influência do espaçamento das árvores de *Eucalyptus grandis* na qualidade da madeira para produção de polpa celulósica kraft. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil. 80 p.

- González-García, M., A. Hevia-Cabal, M. Barrio-Anta. (2013). Modelo Dinámico de Crecimiento y Producción de Biomasa Para Cultivos Energéticos de *Eucalyptus nitens* (Maiden) En El Noroeste de España. In 6^o Congreso Forestal Español, edited by Sociedad Española de Ciencias Forestales, 2–8. Vitoria Gateiz. http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/viewFile/14333/14176.
- Goulart, M., C.R.H. Haselein, J.M. Hoppe, J.A. Farias, D.T. Pauleski. (2003). Massa Específica Básica e Massa Seca de Madeira de *Eucalyptus grandis* Sob o Efeito Do Espaçamento de Plantio e Da Posição Axial No Tronco. *Ciência Florestal*, 13(2): 167–75.
- Hakamada, R., R.M. Hubbard, S. Ferraz, J.L. Stape, C. Lemos. (2017). Biomass Production and Potential Water Stress Increase with Planting Density in Four Highly Productive Clonal *Eucalyptus* Genotypes. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, 2620 (March): 1–7. <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1256041>.
- Harris, F. (2007). The effect of competition on stand, tree, and wood growth and structure in subtropical *Eucalyptus grandis* plantations, PhD thesis, Southern Cross University, Lismore, NSW. 193 p.
- Hinchee, M., W. Rottmann, L. Mullinax, C. Zhang, S. Chang, M. Cunningham, L. Pearson, N. Nehra. (2011). Short-Rotation Woody Crops for Bioenergy and Biofuels Applications. *Biofuels: Global Impact on Renewable Energy, Production Agriculture, and Technological Advancements*, 139–56. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7145-6_8.
- International Energy Agency (IEA). (2010). "World Energy Outlook 2010."
- IRENA. (2016). Innovation Outlook Advanced Liquid Biofuels. http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Innovation_Outlook_Advanced_Liquid_Biofuels_2016.pdf.
- Jacobs, M.R. (1955). Growth Habits of the Eucalypts, Forestry and Timber Bureau. Canberra, New Zeland: Forestry and Timber Bureau. <http://trove.nla.gov.au/version/28637821>.
- Jokela, E.J., K.P. Van Gorp, E.H. White. (1986). Biomass Estimation Equations for Norway Spruce in New York. *Can. J. For. Res.*, 6: 413–15.
- Kojima, M., F.M.Yamaji, H. Yamamoto, M.Yoshida, T. Nakai. (2009). Effects of the Lateral Growth Rate on Wood Quality Parameters of *Eucalyptus grandis* from Different Latitudes in Brazil and Argentina. *Forest Ecology and Management*, 257(10): 2175–81. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.02.026>.
- Kuyah, S., J. Dietz, C. Muthuri, M. Van Noordwijk, H. Neufeldt. (2013). Allometry and Partitioning of Above- and below-Ground Biomass in Farmed *Eucalyptus* Species Dominant in Western Kenyan Agricultural Landscapes. *Biomass and Bioenergy*. Elsevier Ltd, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.011>.
- Larson, A.J., J.A. Lutz, D.C. Donato, J.A. Freund, M.E.S.J. Hille Ris Lambers, D.G. Sprugel, J.F. Franklin. (2015). Spatial Aspects of Tree Mortality Strongly Differ between Young and Old-Growth Forests. *Ecology*, 96(11): 2855–61. <https://doi.org/10.1890/15-0628.1>.
- Larson, P.R., D.E. Kretschmann, A. Clark III, J.G. Isebrands. (2001). Formation and Properties of Juvenile Wood in Southern Pines. A Synopsis. Rhinelander, Wisconsin. United States Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. General Technical Report. 46 p.
- Latorraca, J.V. d., F., C.E. de Albuquerque. (2000). Floresta e Ambiente. *Floresta e Ambiente* 7(1): 279–91.

- Leles, P.S.D.S., G.G.D. Reis, M.D.G.F. Reis, E.J.D. Morais. (2001). Crescimento, Produção e Alocação de Matéria Seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. Pellita* Sob Diferentes Espaçamentos Na Região de Cerrado, MG. *Scientia Forestalis*, 59: 77–87.
- Lopes, E.D., M.L. de Laia, A.S. dos Santos, G.M. Soares, R.W.P. Leite, N.D.S. Martins. (2017). Influência Do Espaçamento de Plantio Na Produção Energética de Clones de *Corymbia* e *Eucalyptus*. *Floresta*, 47(1): 95. <https://doi.org/10.5380/rf.v47i1.47141>.
- Macedo, I.C. de. (2003). *Estado Da Arte e Tendências Tecnológicas Para Energia*. CTenerg. Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Energia. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Ciência, Tecnologia e Inovação. 90 p.
- Machado, F., S.P.S. Guerra, N. Ceragioli, G. Oguri, M.S. Denadai. (2012). Influência Do Espaçamento Na Produtividade e Alocação de Biomassa Em Um Plantio de *Eucalyptus grandis*. In *Congresso Internacional de Bioenergia*, 1–6. São Paulo, Brazil.
- Malan, F S. (2010). The Effect of Planting Density on the Wood Quality of South African-Grown *Eucalyptus grandis*. *The Southern African Forestry Journal*, 205:1, 31-37, <https://doi.org/10.2989/10295920509505235>.
- Malan, F.S., M. Hoon. (1992). Effect of Initial Spacing and Thinning on Some Wood Properties of *Eucalyptus grandis*. *South African Forestry Journal*, 163(163): 13–20. <https://doi.org/10.1080/00382167.1992.9629362>.
- Mello, S.L.D.M., J.L.D.M.Goncalves. (2008). Equations to Estimate Shoot and Root System Biomass in *Eucalyptus grandis* Stands at Sites with Different Productivities. *Revista Arvore*, 32(1): 101–11.
- Mello, W.H. d. A., J.W. Simões, C.A. Ferreira, U.M. Brasil. (1976). Influência Do Espaçamento E Da Idade De Corte Na Produção De Madeira De Eucalipto Em Solo De Cerrado. *IPEF*, 13: 143–62.
- Meneses, V.A., P.F. Trugilho, N. Calegario, H.G. Leite. (2015). Efeito Da Idade e Do Sítio Na Densidade Básica e Produção de Massa Seca de Madeira Em Um Clone Do *Eucalyptus urophylla*. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, 43(105): 101–16.
- MGAP. (1976). Carta de Reconocimiento de Suelos Del Uruguay a Escala 1/1000.000 y Clasificación de Suelos Del Uruguay. Montevideo, Uruguay. 452 p.
- Mimms, A., M.J. Kocurek, J.A. Pyiatte, E.E. Wright. (1993). *Kraft Pulping. A Compilation of Notes*. TAPPI, Atlanta, GA, USA. 181 p.
- Miranda, I., J. Gominho, H. Pereira. (2009). Variation of Heartwood and Sapwood in 18-Year-Old *Eucalyptus globulus* Trees Grown with Different Spacings. *Trees*, 23: 367–72. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0285-9>.
- Müller, M.D. (2005). Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil. 108 p.
- Navarro, A., A.M. Stellacci, P. Campi, C. Vitti, F. Modugno, M. Mastrorilli. (2016). Feasibility of SRC Species for Growing in Mediterranean Conditions. *Bioenergy Research*, 9(1): 208–23. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9677-z>.
- Nuberg, I.K., B. Gunn, M. Tavune, A. Sumareke, O. Kravchuk. (2015). ScienceDirect Evaluation of Short-Rotation Coppicing Fuelwood Production Systems for Papua New Guinea. *Biomass and Bioenergy*, 78. Elsevier Ltd: 126–39. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.04.010>.

- Oliveira, J.T.S. (1997). Caracterização Da Madeira de Eucalipto Para a Construção Civil. Universidade de São Paulo. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, USP, Brasil. 414 p.
- Paulino, E.J. (2012). Influência Do Espaçamento e Da Idade Na Produção de Biomassa e Na Rotação Econômica Em Plantios de Eucalipto. Universidade Federal Dos Vales Do Jequitinhonha e Mucuri. Dissertação de Mestrado. Diamantina, MG, Brasil. 60 p.
- Pelozzi, M.M.A., E.T.D. Severo, F.W. Calonego, P.L.M. Rodrigues. (2012). Propriedades Físicas Dos Lenhos Juvenil e Adulto de *Pinus elliottii* Engelm Var. *elliottii* e de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden. *Ciência Florestal*, 22(2): 305–13.
- Pérez, S., C.J. Renedo, A. Ortiz, M. Mañana, F. Delgado, C. Tejedor. (2011). Energetic Density of Different Forest Species of Energy Crops In Cantabria (Spain). *Biomass and Bioenergy*, 5: 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.09.008>.
- Picard, N., L. Saint-André, M. Henry. (2012). Manual de Construcción de Ecuaciones Alométricas Para Estimar El Volumen y La Biomasa de Los Árboles. Edited by CIRAD-FAO. Montpellier, France.
- Pleguezuelo C.R., V.H. Durán, C. Bielders, J.A. Jiménez, F. Perea, R. Francia. J. (2014). Bioenergy Farming Using Woody Crops. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1): 95–119. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0262-1>.
- Resquin, F., D.J. Mello, I. Fariña, J. Mieres, L. Assandri. (2005). Caracterización de La Celulosa de Especies Del Género *Eucalyptus* Plantadas En Uruguay. Serie Técnica INIA Nro 159. 82 p.
- Resquin, F., C. Rachid. (2012). Influencia de La Edad de Corte En El Pulpeo de *Eucalyptus globulus* Plantado En Uruguay Influence of Harvest Age on Kraft Pulp Production for *Eucalyptus globulus* Planted in Uruguay. *Agrociencia - Uruguay*, 16 (2): 27–38.
- Rocha, M.F.V. (2011). Influencia Do Espacamento e Da Idade Nas Produtividade e Propiedades Da Madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* Para Energía. Dissertação de Mestrado. Universidade Fdederal de Vicosa, MG, Brasil. 86 p.
- Rocha, M.F.V., B.R. Vital, A.C.O. Carneiro, A.M.M.L. Carvalho, M.T. Cardoso, P.R.G. Hein. (2016). Effects of Plant Spacing on the Physical, Chemical and Energy Properties of *Eucalyptus* Wood and Bark. *Journal of Tropical Forest Science*, 28(3): 243–48.
- Rockwood, D.L., A.W. Rudie, S.A. Ralph, J.Y. Zhu, J.E. Winandy. (2008). Energy Product Options for *Eucalyptus* Species Grown as Short Rotation Woody Crops. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(8): 1361–78. <https://doi.org/10.3390/ijms9081361>.
- Sale, G. (2005). A Comparison of Between-Tree Competition Effects in Separate Stands of a *Eucalyptus grandis* Seedling and a Single *Eucalyptus Grandis* x *Urophylla* Hybrid Clone. Pietermaritzburg, South Africa: University of the Witwatersrand. [http://wiredspace.wits.ac.za/bitstream/handle/10539/1725/Giovanni thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://wiredspace.wits.ac.za/bitstream/handle/10539/1725/Giovanni%20thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Santana, M.S., C. Natalino, M.D.C. Arantes, P.F. Trugilho. (2012). Effect of Age and Diameter Class on the Properties of Wood from Clonal *Eucalyptus*. *Cerne*, 18(1): 1–8.
- Santos, M.D.B.R., L.A.B. Jorge, M.M. Mischan, A.L. dos Santos, A.W. Balarin. (2017). Avaliação Da Produção de Biomassa Do Fuste de Um Clone Híbrido de Eucalipto Sob Diferentes Espaçamentos. *Ciência Florestal*, 27(1): 31–45.

- Santos, M.D. (2011). Efeito Do Espaçamento de Plantio Na Biomassa Do Fuste de Um Clone Híbrido Interespecífico de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, SP, Brasil. 152 p.
- Schönau, A.P.G., J. Coetzee. (1989). Initial Spacing, Stand Density and Thinning in Eucalypt Plantations. *Forest Ecology and Management*, 29(4): 245–66. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(89\)90097-2](https://doi.org/10.1016/0378-1127(89)90097-2).
- Senelwa, K., R.E.H. Sims. (1999). Fuel Characteristics of Short Rotation Forest Biomass. *Biomass and Bioenergy*, 17: 127–40.
- Sette Jr, R.C., I.R.D. Oliveira, M. Tomazello Filho, F. Minoru, J.P. Laclau. (2012). Efeito Da Idade e Posição de Amostragem Na Densidade e Características Anatômicas Da Madeira de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, 36(6): 1183–90. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000600019>.
- Sims, R.E.H., T.G. Maiava, B.T. Bullock. (2001). Short Rotation Coppice Tree Species Selection for Woody Biomass Production in New Zealand. *Biomass and Bioenergy*, 20(5): 329–35. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00093-3).
- Sims, R.E.H., A. Hastings, B. Schlamadinger, G. Taylor, P. Smith. (2006). Energy Crops: Current Status and Future Prospects. *Global Change Biology*, 12: 2054–76. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01163.x>.
- Soares, A.A.V., H.G. Leite, A.L. Souza, S.R. Silva, H.M. Lourenço, D.I. Forrester. (2016). Increasing Stand Structural Heterogeneity Reduces Productivity in Brazilian Eucalyptus Monoclonal Stands. *Forest Ecology and Management*, 373: 26–32. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.04.035>.
- Sochacki, S.J., R.J. Harper, K.R.J. Smettem. (2007). Estimation of Woody Biomass Production from a Short-Rotation Bio-Energy System in Semi-Arid Australia. *Biomass and Bioenergy*, 31(9): 608–16. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.06.020>.
- Souza, L.J.B., R.V. Soares, A.C. Batista. (2003). Modelagem Do Material Combustível Superficial Em Povoamentos Fuel Modeling in *Eucalyptus dunnii* Plantations in Três Barras County, SC. *Cerne*, 9(2): 231–45.
- Souza, R.N. (1989). Efeito de Dois Espaçamentos Na Produção Em Peso e Volume de *Eucalyptus grandis* (W. Hill Ex Maiden). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil. 102 p.
- Sturion, J.A., J.C.D. Pereira, M.S. Chemin. (1988). Qualidade Da Madeira de *Eucalyptus viminalis* Para Fins Energéticos Em Função Do Espaçamento e Idade de Corte. *Boletim de Pesquisa Florestal*, 16: 55–59. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Swain, P.K., L.M. Das, S.N. Naik. (2011). Biomass to Liquid: A Prospective Challenge to Research and Development in 21st Century. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9). Elsevier Ltd: 4917–33. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.061>.
- Ter-Mikaelian, M.T., M.D. Korzukhin. (1997). Biomass Equations for Sixty-Five North American Tree Species. *Forest Ecology and Management*, 97(1). Elsevier: 1–24.
- Thomas, D.S., K.D. Montagu, J.P. Conroy. (2004). Changes in Wood Density of *Eucalyptus camaldulensis* Due to Temperature – the Physiological Link between Water Viscosity and Wood Anatomy. *Forest Ecology and Management*, 193: 157–65. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.028>.

- Thomas, D.S., K.D. Montagu, J.P. Conroy. (2007). Temperature Effects on Wood Anatomy, Wood Density, Photosynthesis and Biomass Partitioning of *Eucalyptus grandis* Seedlings. *Tree Physiology*, 27: 251–60.
- Tomé, M., T. Verwijst. (1996). Modelling Competition in Short Rotation Forests. *Biomass & Bioenergy*, 11(2–3): 177–87. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(96\)00042-6](https://doi.org/10.1016/0961-9534(96)00042-6).
- Turvey, N.D. (2015). Competition in Mixed Stands of *Pinus radiata* and *Eucalyptus obliqua*. *Journal of Applied Ecology*, 33(1): 87–99.
- Tuset, R., F. Durán, C. Mantero, G. Baillod, A. Aber, S Böthig, A. Ono. (2008). *Manual de Maderas Comerciales, Equipos y Procesos de Utilización*, Volumen 2. Edited by Hemisferio Sur. Montevideo, Uruguay.
- Van Gunst, K.J.V., P.J. Weisberg, J. Yang, Y. Fan. (2016). Do Denser Forests Have Greater Risk of Tree Mortality: A Remote Sensing Analysis of Density-Dependent Forest Mortality. *Forest Ecology and Management*, 359: 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.09.032>.
- Vega-Nieva, D.J., E. Valero, J. Picos, E. Jiménez. (2015). Modeling the above and Belowground Biomass of Planted and Coppiced *Eucalyptus globulus* Stands in NW Spain. *Annals of Forest Science*, 72, 967–980. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0493-6>.
- Verwijst, T., B. Telenius. (1999). Biomass Estimation Procedures in Short Rotation Forestry. *Forest Ecology and Management*, 121: 137–46.
- Vital, B.R., R.M. Della Lucia. (1987). Efeito Do Espacamento Na Producao Em Peso e Na Qualidade Da Madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* Aos 52 Meses de Idade. *Árvore*, 11(2): 132–45.
- Warren, E., R.G.B. Smith, L.A. Apolaza, J.C.F. Walker. (2009). Effect of Stocking on Juvenile Wood Stiffness for Three *Eucalyptus* Species. *New Forests*, 37(3): 241–50. <https://doi.org/10.1007/s11056-008-9120-9>.
- Weiner, J, P.S., H. Muller-Landau, A. Jasentuliyana, S.D. Wilson. (2001). The Effects of Density, Spatial Pattern, and Competitive Symmetry on Size Variation in Simulated Plant Populations. *The American Naturalist*, 158(4): 438–50. <https://doi.org/10.1086/321988>.
- Wilkins, A.P., R. Horne. (1991). Wood-Density Variation of Young Plantation-Grown *Eucalyptus grandis* in Response to Silvicultural Treatments. *Forest Ecology and Management*, 40(1–2): 39–50. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90090-I](https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90090-I).
- Winck, R.A., H.E. Fassola, S.R. Barth, E. Crechi, A.E. Keller, D. Videla, C. Zaderenko. (2015). Modelos Predictivos de Biomasa Aérea de *Eucalyptus grandis* Para El Noreste de Argentina. *Ciência Florestal*, 25(3): 595–606. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-50982015000300595&nrm=iso.
- Xue, L., L. Pan, R. Zhang, P. bo Xu. (2011). Density Effects on the Growth of Self-Thinning *Eucalyptus urophylla* Stands. *Trees - Structure and Function*, 25(6): 1021–31. <https://doi.org/10.1007/s00468-011-0576-4>.
- Yaman, S. (2004). Pyrolysis of Biomass to Produce Fuels and Chemical Feedstocks. *Energy Conversion and Management*, 45(5): 651–71. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00177-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00177-8).

- Yang, Y., J.G. Brammer, A. S N Mahmood, A. Hornung. (2014). Intermediate Pyrolysis of Biomass Energy Pellets for Producing Sustainable Liquid, Gaseous and Solid Fuels. *Bioresource Technology* 169. Elsevier Ltd: 794–99. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.044>.
- Zobel, B.J., J.B. Jett. (1995). *Genetics of Wood Production*. Edited by T.E. Timmel. Syracuse: Springer-Verlag.

Web References

- MGAP-DGF. Consultado el 12 de Abril de 2017. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,dgf,dgf-legislacion,0,es,0>,
- INUMET. Consultado el 12 de Abril de 2017. Disponible en <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas>

Bambú en Perú

Mary Flor Césare^{1*}, José Luis Titto¹, Raphael Paucar²,
José Luis Calle³

¹Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Agraria La Molina. Av. La Molina s/n, La Molina, Perú.

²Red Internacional del Bambú y el Ratán - IMBAR

³Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina. Av. La Molina s/n, La Molina Perú.

*Autor para correspondencia: mcesare@lamolina.edu.pe

1. Características generales

El bambú es una gramínea de la subfamilia bambusoideae, una de las doce subfamilias reconocidas actualmente dentro de la familia Poaceae. Sin embargo, es preciso aclarar que con el nombre bambú se designa a una categoría “paraguas” que contiene alrededor de 1600 especies diferentes distribuidas en todo el mundo tal como lo precisa la Red Internacional de Bambú y Ratán (INBAR). Los bambúes tienen un porte recto y alto, llegando a alcanzar entre 20 y 30 m en estado de madurez. Estos árboles se caracterizan por corteza lisa y verdosa blanquecina, que, en constante renovación, libera escamas que provocan manchas grises o parduscas sobre el tronco. Las hojas son lanceoladas u ovaladas de color verde.

El número de especies descritas de bambú varía de acuerdo a los autores, el INBAR (2015) sostiene que existe alrededor de 1600 especies, Mercedes (2006) menciona que existe 1250 especies, mientras que el Centro de Investigación sobre la Desertificación de la Universidad de Sassari (NRD UNISS) y la Fundación AVSI (2017) describe que en el mundo existe más de 1100 especies diferentes. El Grupo de Filogenia de Bambú [BPG] (2012) describe a 1482 especies clasificadas aproximadamente en 119 géneros, que a su vez se agrupan en tres tribus: Arundinarieae (bambúes leñosos templados, 546 especies), Bambuseae (bambúes leñosos tropicales, 812 especies) y Olfiferae (bambúes herbáceas, 124 especies). Los bambúes se encuentran de manera natural en todos los continentes, excepto en Europa. Las especies más comunes de acuerdo a su grado de importancia son: 1) *Guadua angustifolia* Kunt 2) *Guadua amplexifolia* Presl, 3) *Guadua macrospiculata* X. Londoño y L.G. Clark, 4) *Aulonemia queko* 5) *G. ocladum geminatum* (McClure), (6) *R. harmonicum* (Pilger)

McClure, 7) *R. longispiculatum* X. Londoño y L.G. *emiflorum* (Steudel) McClure, 9) *Chusquea antioquiensis* L.G. Clarky & X. Londoño y (10) *Chusquea subulata* L.G. Clark.



Figura 1. Plantación de bambú.

2. Biología

La biología del bambú, se muestra a continuación, en la Tabla 1, según su clasificación:

Tabla 1. Clasificación de bambú.

Grupo:	Angiosperma
Clase:	Monocotiledóneas
Orden:	Poales
Familia:	<i>Poaceae</i>
Subfamilia:	<i>Bambusoideae</i>

Así la subfamilia *Bambusoideae* presenta dos tipos de formas de vida bambusoideo herbáceo y bambusoideo arborecente.

En el Perú, el bambú es conocido con diferentes nombres según la región donde se encuentre, así es llamada caña Guayaquil o bambú macho en el distrito de mala, Paca en Madre de Dios, Capiro en Satipo y Maroma en San Martín.

2.1 Principales géneros de bambú en el Perú

La Tabla 2 nos muestra los diferentes géneros presentes en el Perú.

Tabla 2. Clasificación de bambú

Género y N° Especies nativas:	Género y N° Especies Exóticas
<i>Arthrostylidium</i> sp 2	<i>Aulonemi</i> sp 7
<i>Chusquea</i> sp 22	<i>Bambusa</i> sp 5
<i>Elytrostachys</i> sp 1	<i>Dendrocalamus</i> sp 1
<i>Guadua</i> sp 5	<i>Phyllostachys</i> sp 2
<i>Merostachys</i> sp 1	<i>Gigantocloa</i> 1
<i>Neurolepts</i> sp 2	<i>Rhipidocladum</i> 2

Fuente: Bambú: Biología, cultivo, Manejo y usos en el Perú. López 2011.

3. Estado de madurez del Bambú

En las siguientes figuras se muestra el desarrollo del estado de madurez del bambú, en los 4 primeros días emerge el brote del bambú, este estadio dura hasta que pierde las hojas caulinares, lo cual sucede entre los 5 a 6 meses, pasando el bambú a un estadio de bambú verde claro, presentando un anillo blanco alrededor de los nudos, finalmente el bambú alcanza el estado de madurez entre los 4 a 5 años, alcanzando las propiedades físico - mecánicas, presentando un color verde oscuro y líquenes en sus tallos, las ramas superiores se secan, la intensidad del color blanco en los nudos disminuye Paucar, Llerena (2018).



Figura 2. Diferentes estadios de una planta de bambú

Fuente: <https://www.mindomo.com/fr/mindmap/maderas-94cceedf29994b1ca52a05edcad3781a>

4. Características botánicas

El bambú presenta una estructura basada en una caña segmentada en nudos, entrenudos y ramificaciones, a continuación, en la Figura 3 se muestra las partes de una planta del bambú.

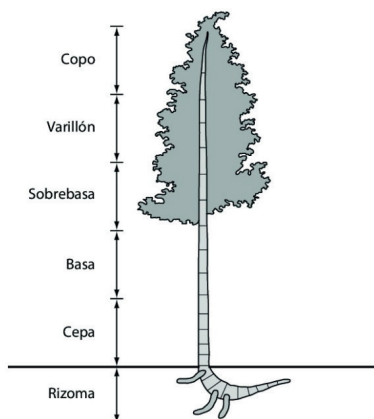


Figura 3. Partes de bambú.

Fuente: Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (*Guadua angustifolia*) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos (Estrada, 2010).

4.1 Rizomas

El rizoma del bambú es sistema subterráneo importante con múltiples ramificación que es responsable de la estructura, estabilidad, almacenamiento de nutrientes de fotosíntesis y es un elemento básico para la propagación del bambú. Los rizomas varían en apariencia (color) y características, dependiendo de la especie (Banik, 2015; Bruto, 2009). De acuerdo a su morfología, los rizomas se dividen en dos tipos: leptomorfo (monopoidal, invasivo) y paquimorfo (simpoidal, de matorral) (Banik, 2015).



Figura 4. Rizomas de bambú a) Rizomas leptomórficos b) Rizomas paquimórficos (Permatrì, 2016).

4.2 Raíz

Las raíces se forman en la región nodal del rizoma (Akinlabi et al., 2017). Ayuda en el transporte y almacenamiento de nutrientes, a su vez permite el anclaje estructural en el suelo. Con respecto a la forma y tamaño, las raíces de bambú son simétricas y tienen diámetros que van desde 0.4 a 4.8 mm y no va más allá de 70 cm debajo de la superficie (Banik, 2015).

4.3 Brotes

Estos se caracterizan por estar cubiertos de hojas caulinares de diversa forma, color, textura y tamaño, la mayoría de los cuales pueden ser utilizadas como alimento; pero por sus cualidades culinarias, las más adecuadas son de las especies *Phyllostachys pubescens* y *Dendrocalamus asper*. En promedio, 100 g de brote contiene 0.5 a 0.77 g. de fibra, 81 a 96 mg de calcio, 0.5 a 1.7 mg de hierro, 3.2 a 5.7 mg de vitamina C, 0.07 a 0.14 mg de vitamina B, 1.3 a 2.3 g de proteína, 4.2 a 6.1 g de hidratos de carbono, 42 a 59 mg de fósforo y 1.8 a 4.1 g de glucosa. Los brotes pueden contener hasta 17 aminoácidos, en particular la sacaropina, el ácido esperámico y el ácido glutámico. Algunas especies también contienen cantidades importantes de potasio y vitamina A.



Figura 5. Brotes de bambú de *Guadua angustifolia*.

4.4 Tallo

El tallo del bambú es propiamente dicho el culmo, también se le llama caña o vara. El culmo es la parte más visible de la planta que se desarrolla a partir de los brotes. Aparecen como cilindros alargados con articulaciones intermitentes conocidos como nodos. En general, los culmos varían en dimensiones y color dependiendo de las especies. El culmo tiene tres principales constituyentes: el tallo, base del tallo y peciolo del tallo (Akinlabi et al., 2017).

Los culmos pueden ser erectos, zigzagueantes, doblados o rezagados. El diámetro del tallo varía de especie a especie, hay tallo de especies tan delgadas como lápiz, otras de casi 20 cm de diámetro. Banik (2015) observó que el diámetro de la caña de bambú es en función de las condiciones de hábitat y la edad. A medida que incrementa la edad, el

diámetro de los culmos generados también se incrementa. El espesor máximo de la pared del culmo se ubica en la región base y superior, mientras que la región media tiene paredes más delgadas. La ventaja de tener paredes delgadas es ayudar a mejorar la propiedad elástica del bambú para resistir la carga externa del fenómeno natural.



Figura 6. Tallo de bambú *Guadua angustifolia*.

El color de los culmos es de acuerdo a las especies siendo el color verde el color más dominante, sin embargo, puede ser amarillo, marrón, púrpura, rayado o negro como *Phyllostachys nigra*.

El tallo de bambú puede ser cónico o elíptico y comprende varios nudos y entrenudos. El entrenudo es hueco con nudos en ambos extremos. Los nudos contribuyen a asegurar que el bambú sea relativamente recto y permite el almacenamiento de agua y nutrientes. La longitud del entrenudo es en función de la especie y la genética. La vaina y los brotes se desarrollan y emergen de la región nodal.

4.5 Vaina

El desarrollo de la vaina depende del órgano de la vaina, que emerge del nodo del bambú. Existen varios tipos de vaina: vaina del culmo, vaina de la hoja, vaina ramificada y vaina del rizoma. Sin embargo, la más visible son las vainas del culmo.

La vaina del culmo es básicamente una hoja modificada que comprende una cuchilla, lígula y aurículas. La vaina es específica para cada especie y es utilizada para la identificación del bambú. Dependiendo de la especie, las vainas pueden o no caerse.

4.6 Ramas

Las ramas se desarrollan a partir de cogollos cubiertos por vainas laterales, que emergen por encima de la vaina. La ramificación se produce cuando surge el culmo o al año siguiente, denominado silepsis o prolepsis, respectivamente. La silepsis se observa en los

géneros *Bambusa*, mientras que la prolepsis es típica de *Melocanna baccifera*. Dependiendo de la especie, puede producirse dos tipos principales de ramificación: ramificación dominante-robusta (se observa en los generos *Bambusa*) y numerosas ramificaciones subequales (se observa en *Molocanna baccifera*).



Figura 7. Ramas de bambú *Guadua angustifolia*.

Fuente: Propagación de la *Guadua*. Corporación autónoma regional del valle del cauca Oficina de gestión ambiental territorial centro sur (Castaño, 2018).

4.7 Hojas

Las hojas de los bambúes se dividen en dos tipos: hoja caulinar y hoja de follaje (con capacidad de realizar fotosíntesis). Son muy variables en tamaño y forma. En la primera etapa del crecimiento; pueden ser ovals, lanceoladas y oblongo-lanceoladas; son lisas o casi lisas en la superficie superior. Morfológicamente, las hojas exhiben venación paralela. El dimorfismo foliar se observa en la mayoría de las especies de bambú, dependiendo de la edad y también a variaciones estacionales.



Figura 8. a) Hojas caulinares. b) hojas de follaje.

4.8 Flor

Generalmente, los bambúes no son plantas con flores anuales, sino en la mayoría de los casos, la floración es después de un largo intervalo de fase vegetativa de la vida, que es

de 15 a 60 años en bambúes tropicales y 60–120 años en bambúes de regiones templadas. Existe evidencia de ciclos de floración regular de 30 años para la mayoría de especie de bambú leñosos tropicales, ejemplo la *Guadua angustifolia* (INBAR, 2015; Guerreiro, 2013).



Figura 9. a) Inflorescencia: a) *Chusquea picta*, b) *Guadua weberbaueri*.

Fuente: Ortiz, Rodríguez. Caracterización y clave de identificación de los bambúes en la región nor-oriental (San Martín, Amazonas y Cajamarca). Revista *Bambucyt*. 2018.

4.9 Semillas

Todos los individuos con el mismo recurso genético florecen simultáneamente en lugares distantes como países y continentes, las flores de casi todas las especies de bambú producen pequeñas semillas como el grano de maíz. Los agricultores tribales pueden recolectar en esa ocasión 20–30 kg de semilla por día para ser utilizado como arroz. Sin embargo, hay una especie de bambú, *Melocanna baccifera*, que en lugar de pequeñas semillas desarrolla grandes frutos en forma de pera de aproximadamente 35 mm hasta 45 mm de diámetro, distribuidos en las ramas. Los frutos son comestibles y contiene una pulpa rica con aproximadamente 50% de almidón y 12% de proteína (Liese y Kohl, 2015).



Figura 10. Semillas de bambú *Guadua weberbaueri*.

5. Distribución

Los bosques de bambú del mundo se distribuyen principalmente en zonas con clima tropical y subtropical, en Asia-Pacífico (67%), América (30%) y África (3%). No hay especies nativas en Europa (Huang, 2019).

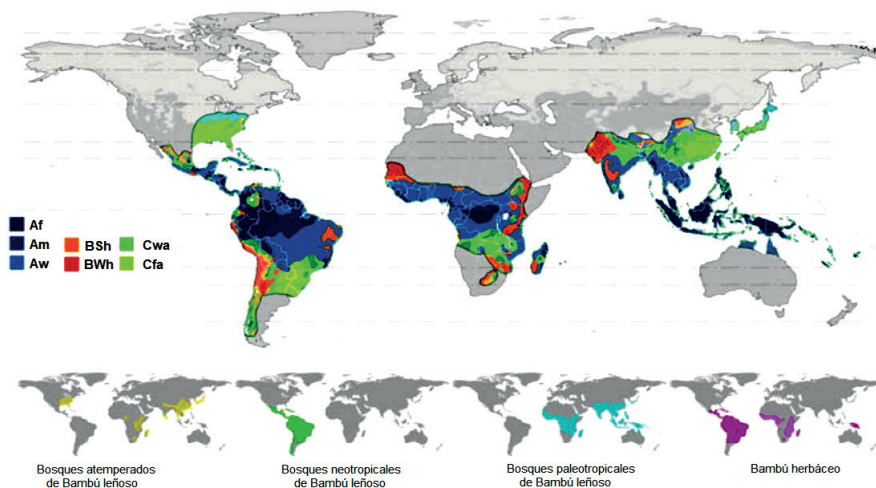


Figura 11. La distribución de bosque de bambú. Nota Af: Clima selva tropical; Am: clima monzón tropical; Aw: clima de sabana tropical; BSh: clima semárido caliente; BWh: clima caliente del desierto; Cwa/Cfa: clima subtropical húmedo.

Fuente: Huang, 2019.

Los bambúes tienen una distribución latitudinal de 47° S a 40° N y una distribución altitudinal desde el nivel del mar hasta 4300 m s.n.m (Ohrnberger, 1999). En el hemisferio occidental, la distribución natural conocida se extiende desde los 39°25' N en el E de los Estados Unidos hasta los 45°23'30'' S en Chile y a 47° S en Argentina (INBAR, 2014).

6. Exigencias del cultivo

6.1 Topografía y suelo

El rendimiento y la biomasa aérea de bambúes en llanuras es cuatro veces más que en laderas. Entre la pendiente empinada, suave y terreno llano, el terreno en pendiente suave hasta 30° es más favorable para el crecimiento de bambú (Liese y Kohl, 2015).

La mayoría de los bambúes presentan un crecimiento normal en suelos arenosos y bien drenados. También en suelos franco arcillosos, siempre que las condiciones de drenaje, lluvia y temperatura sean favorables. La topografía y la condición del suelo son los principales factores que afectan el crecimiento dentro de la misma región climática. Suelo suelto y fértil con alto contenido de materia orgánica, buena capacidad de retención de

agua y permeabilidad facilita el crecimiento del rizoma. El crecimiento del rizoma se retrasa y se retuerce con rizomas cortos y anormales en suelos compactos y pesados que tiene poca agua, baja permeabilidad y bajo contenido de nutrientes. El contenido de N del suelo es el factor más importante que afecta al crecimiento del bambú, pero la materia orgánica, la textura, la aireación, la capacidad de intercambio de bases y la profundidad también importante. El pH de 5.0 – 6.5 es adecuado para la mayoría de bambúes; algunas especies pueden crecer incluso a pH 3.5.

6.2 Temperatura y luz

La mayoría de los bambúes crecen a temperaturas que oscilan desde 7 a 40 °C. En general, la temperatura alta acelera el crecimiento de bambú y la baja temperatura la inhibe. El bambú prefiere la luz para su crecimiento saludable. Los meses productivos de aparición de culmo tiene días de fotoperiodo más largo.

6.3 Altitud

La altitud afecta la distribución de bambú. Los bambúes leñosos incrementan su diversidad a medida que ascienden a las montañas, se observa una mayor concentración de especies entre los 2000 – 3000 m sobre el nivel del mar. Por debajo de los 1000 m de altitud, la diversidad disminuye y predominan los géneros *Arthrostyidium*, *Guadua* y *Rhipicladum*. Por encima de los 3000 m únicamente se encuentran las especies de los géneros *Chusquea*, *Neurolepsis* y *Aulonemia* (INBAR, 2014).

6.4 Precipitaciones

Los bambúes son escasos en zonas con precipitación menor a 1050 mm. El límite superior no se conoce, pero las especies (*M. baccifera*, *Melocalamus compactiflorus*) crecen en zonas con más de 6350 mm. El rango más común es de 12000 a 4000 mm por año. La lluvia promueve el crecimiento del culmo durante el período de alargamiento rápido.

7. Principales enfermedades y plagas

Durante toda su vida, los bambúes como otras plantas esta sujetas a daños por varios tipos de plagas y enfermedades. Las plagas de insectos y enfermedades son la principal razón que causan pérdidas de bambú en la naturaleza. Se estima que la cantidad de insectos que se alimentan de bambúes es cerca de 1200 (Wang, 2004) y los hongos y saprofitos es más de 400.

7.1 Insectos

Gusano alambre de bambú

Es el nombre común de las larvas de escarabajos que vive en el suelo (*Coleoptera: Elateridae*), han producido pérdidas económicas en la producción de bambú en China. Las larvas dañan el brote subterráneo y el sistema de raíces del bambú.



Figura 12. Daño causado por gusano de alambre: a) brote de *Phyllostachys praecox* afectado; b) bambúes muertos causados por gusano de alambre. Fuente: Shu y Wang, 2015.

Noctuidos

Noctuidos de bambú (*Lepidoptera: Noctuidae*) se alimentan de brotes de bambú. Entre ellos *Kumasia kumaso*, *Apamea apameoides*, *Oligia vulgaris*, y *Apamea repetita conjuncta* es la mas importante, que puede causar cerca de 90% de muertes. Es común encontrar varias de estas especies junto a los brotes de bambú. El daño es causado por las larvas, que perforan dentro de los nuevos brotes y tallos y causan la muerte o daño de los brotes en la mayoría de los casos.



Figura 13. Noctuidos de bambú. (a) *Apamea kumaso*; (b) *Oligia vulgaris*; (c) *Apamea apameoidis*; (d) *Apamea repetita conjuncta*.

Fuente: Shu y Wang, 2015.

Gorgojos de bambú

Hay alrededor de 18 especies de gorgojos (*Coleoptera: Curculionidae*) distribuidas en China, Bangladesh, Japón, India, Myanmar, Brasil Sri Lanka que atacan los brotes de bambú. Tanto los adultos como las larvas de estos gorgojos se alimentan de brotes, aunque las larvas, son las que perfora los brotes de bambú, y son responsable de la mayor parte del daño.

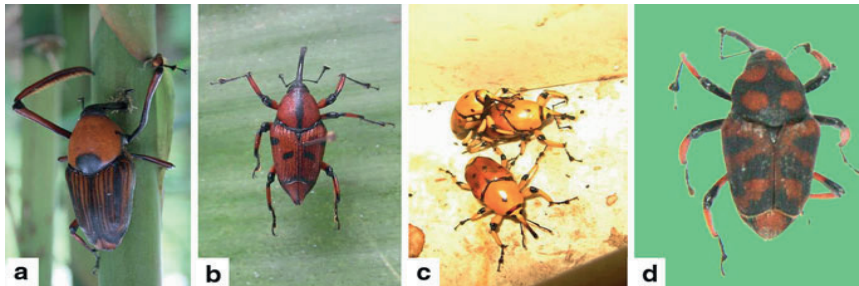


Figura 14. Gorgojos del brote de bambú. (a) *Cyrtotrachelus longimanus*; (b) *Otidognathus davidis*; (c) *Otidognathus* sp.; (d) *Otidognathus rubriceps*. (Shu y Wang, 2015).



Figura 15. Síntomas producido por gorgojos del brote de bambú (Shu y Wang, 2015).

Langosta de bambú

La langosta es uno de los grupos de insectos plaga más importante que afecta al bambú. Existe alrededor de 40 especies de langostas de bambú que se alimentan de las hojas de bambú. Se clasifican en varios géneros de los cuales *Hieroglyphus* son los más comunes. Tanto los adultos como las ninfas se alimentan de los brotes y hojas de bambú. Causan una defoliación completa del soporte de bambú.

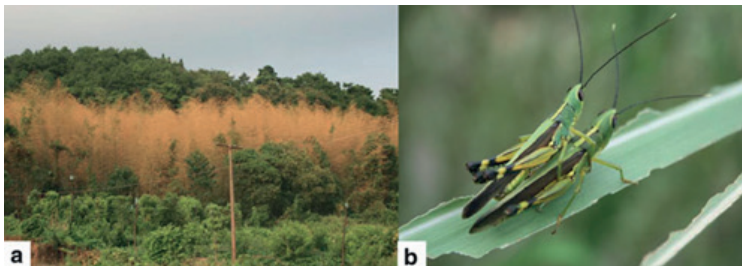


Figura 16. Síntomas de daños por langostas de bambú. a) Langostas comen hojas de bambú; b) Adulto de las langostas espinas amarillas de bambú.

Rodillos de hojas

Los rodillos de hojas (*Lepidoptera Pyralidae*) pertenecen a los grupos más importantes de comederos de hojas de bambú. Mas de diez especies de rodillos de hojas atacan a bambúes. Entre ellos, cuatro especies *Algedonia coclesalis*, *Crocidophora evenoralis*, *Demoboty pervulgalis*, y *Circobotys aurealis* son los más importantes. El daño es causado por las larvas, que unen las hojas como cajas y se alimenta de los tejidos superiores de las hojas.

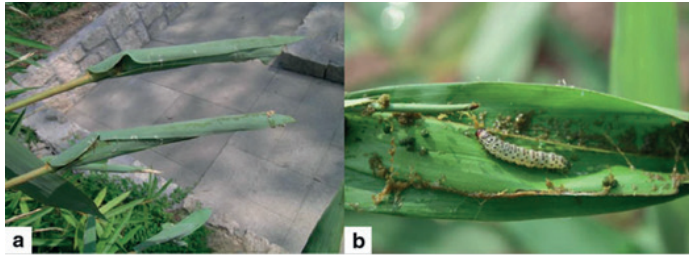


Figura 17. Síntomas de daño de los rodillos de la hoja. a) rodillo de hoja; b) larvas en rodillo.

Plagas del culmo y rama

Existe más de 300 especies que se alimentan de ramas y tallos de bambú, la mayoría de estos son plagas de insectos (Xu y Wang, 2004). Las especies más importantes son: insecto hedor (Hemiptera Pentatomidae), insecto coreido (Hemiptera Coreidae), frog-hoppers (Homoptera Cercopidae), pulgones (Homoptera:aphididae), insectos escamosos (Homoptera: Asterolecaniidae) y los que producen llagas (Hymenoptera Eurytomidae y Ceraphronidae). En muchos casos, tanto las ninfas como los adultos tienen piezas bucales perforadoras y chupadoras altamente modificadas, se alimentan de la savia de las hojas, inyectan compuestos tóxicos en la planta y transmiten enfermedades. Los resultados son defoliación, marchitamiento de brotes y ramas jóvenes e incluso la muerte del culmo.

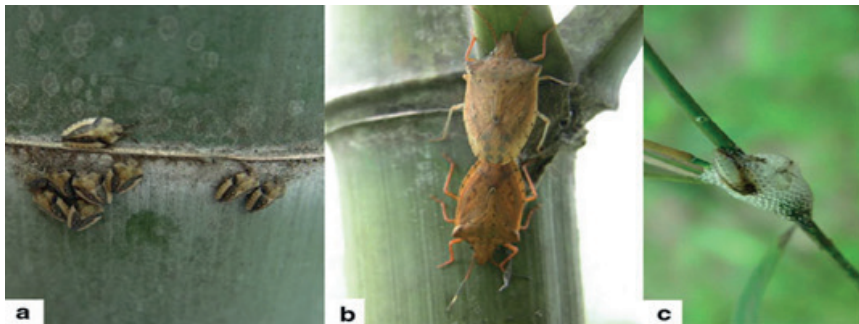


Figura 18. Síntomas de daño de insecto y frog hopper. a) *Hippotiscus dorsalis*; (b) *Brachymna tenuis*; (c) *Aphrophora horizontalis*.

7.2 Enfermedades del bambú

Un total de 440 hongos, tres bacterias, dos virus han sido asociados a enfermedades y trastornos de bambú (Zhou et al., 2010). Las enfermedades se reconocen como potencialmente raes y afectan la industria del bambú, así como la economía rural en su conjunto. Estas enfermedades incluyen el tizón del culmo causado por *Sarocladium oryzae*, escoba de brujas causado por *Balansia* spp, mosaico del culmo causado por el virus del mosaico del bambú (BaMV), óxido de culmo causado por *Stereostylum corticioides*, tizón superior de *Phyllostachys* spp. Causado por *Ceratopharia phyllostachydis*.

8. Técnicas de cultivo

8.1 Preparación de suelo

Las plantas de bambú requieren de abundante luz al inicio de su desarrollo. Si existe sombra, éste debe ser eliminado mediante podas, el área libre de malezas debe tener 1.5 m de diámetro.

8.2 Marco de plantación

El hoyo recomendado para la siembra debe medir 70 cm de largo, por 30 cm de ancho y 30 cm de profundidad. Para el marcado se puede disponer de una cuerda sobre el suelo donde se marca la distancia de los hoyos de acuerdo al marco seleccionado. Los marcos de plantación deben elegirse respondiendo si la especie es paquimorfa o es leptomorfa, así como a su porte y crecimiento específico; también depende del producto a comercializar y la calidad o fertilidad del terreno. Los marcos de plantación convenientes promueven la productividad, pero estos solo pueden ser mantenidos con la adecuada selección de las cañas de bambú. Para el marco de plantación deben considerarse además los criterios ecológicos, fisiológicos, de mantenimiento de la plantación incluyendo, el orden de prioridad y el control de plagas (Mercedes, 2006).



Figura 19. Trazado y hoyado del terreno. Fuente: Corporación autónoma regional del valle del cauca Oficina de gestión ambiental territorial centro sur (Castaño, 2018).

8.3 Tecnología de fertilización

En terrenos de baja fertilidad o después de un entresaque, se puede abonar las plantas para que los nuevos rebrotes se desarrollen vigorosos y resistentes; ya sea con estiércol o con otros abonos comerciales. Una fórmula ensayada por la Universidad de Colombia, para guadua (*Guadua angustifolia*), en la etapa inicial de plantación con muy buenos resultados, es la aplicación de 60 gr. de urea; 100 gr. de superfosfato triple; 80 gr. de cloruro de potasio y 20 gr. de bórax, a plantas individuales.

8.4 Tecnología de propagación y plantación

Los métodos de propagación o reproducción de los bambúes pueden ser sexuales o vegetativa, siendo estas de las siguientes formas:

8.4.1 Reproducción por cortes del rizoma

Es la forma más segura y efectiva; su eficiencia en términos de supervivencia casi siempre es del 100%. Los rizomas se obtienen de 1 a 2 años de edad luego de la siembra. Los brotes a partir de cortes de rizomas aparecen a los 30 y 35 días de haberlos sembrado. Existen dos variantes:

- Siembra del rizoma. Que consiste en sacar los rizomas de 2-4 años de edad. Se cortan en secciones de 30 cm Excavar los hoyos de 1 m de ancho, 0.6 m de profundidad. Colocar los rizomas acostados con las yemas en ambos lados y tapar con unos 5-10 cm de tierra.
- Trasplante de rizomas con matitas de 1-2 años de edad, con rizoma, se cortan los tallos a 2 m de altura y se excava la raíz con el rizoma, para ser trasplantada.



Figura 20. Rizomas de bambú a) *Guadua angustifolia*; b) *Dendrocalamus asper*.

Fuente: Forest Bambú Perú. Trillo, 2019.

8.4.2 Propagación por sección de tallos

Esta modalidad requiere del aprovechamiento de tallos jóvenes de 2 a 3 años de edad. El procedimiento es:

- Se parte, divide o secciona el tallo en unidades de dos o tres entrenudos que contengan 3 a 4 nudos con buenas yemas.
- Entre cada dos nudos se hace un hueco y se llena de agua; posteriormente se tapa y se cubre con tierra,
- Se plantan de manera vertical, inclinada u horizontal.

En cualquier caso, debe cuidarse que las yemas laterales no se dañen y dejar una porción de 10 cm de ramas. Los segmentos del tallo deben ser perforados en los entrenudos y echarle agua dentro del cilindro. Al plantar estos segmentos se puede agregar arena dentro del hoyo para facilitar el enraizamiento.



Figura 21. Sembrado de secciones de tallo a) *Guadua angustifolia*; b) *Dendrocalamus asper*.

Fuente: Forest Bambú Perú. Trillo, 2019

Método de siembra de tallo

A diferencia del método anterior, se entierra el tallo entero sin dividirlo. Los pasos son:

- Se escoge un tallo o brote con edad de 1 o 2 años
- Se excava una zanja con suficiente profundidad como para acostar el tallo entero.
- Se coloca el tallo con las yemas de los nudos a los lados.
- Se le realiza un hueco en cada entrenudo y se llena con agua
- Luego se tapan con una piedra pequeña o la sección del tallo que fue cortada. Y se cubre todo el tallo con unos 5-8 cm de tierra.
- Se moja bien el área donde fue colocado el tallo

Método de chusquines

Este método consiste en buscar las plántulas que recién inician su desarrollo. Su nombre proviene del género *Chusquea* en el que es altamente exitoso.

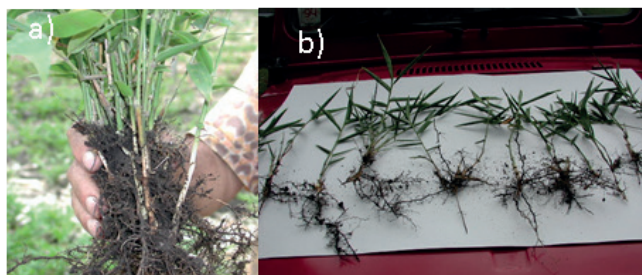


Figura 20. Mata de chusquines b) deshije de chusquines.

Fuente: Corporación autónoma regional del valle del cauca Oficina de gestión ambiental territorial centro sur. Castaño, 2018.

Se repican en los canteros las plántulas de 1 a 3 años (de regeneración natural en el campo). Las secciones a trasplantar deben tener buenas cañas o tallos, altura y diámetro.

Al estimularse el desarrollo de nuevos y abundantes culmos pequeños, se extraen las plantas trasplantadas para desprenderles los pequeños culmos exteriores (con sus raíces y rizomas) en desarrollo. A estos pequeños culmos se les llama Chusquines. La planta madre se vuelve a colocar en el cantero.

Los chusquines son trasplantados en fundas y colocados durante 3 semanas, a sombra controlada y alta humedad. Luego se llevan a la zona de crecimiento para su posterior trasplante en el campo.

Método de las ramas basales

Se toma las ramas basales, de donde se seleccionará el esqueje. Antes de ser sembrado el esqueje debe ser desinfectado, aplicar enraizador

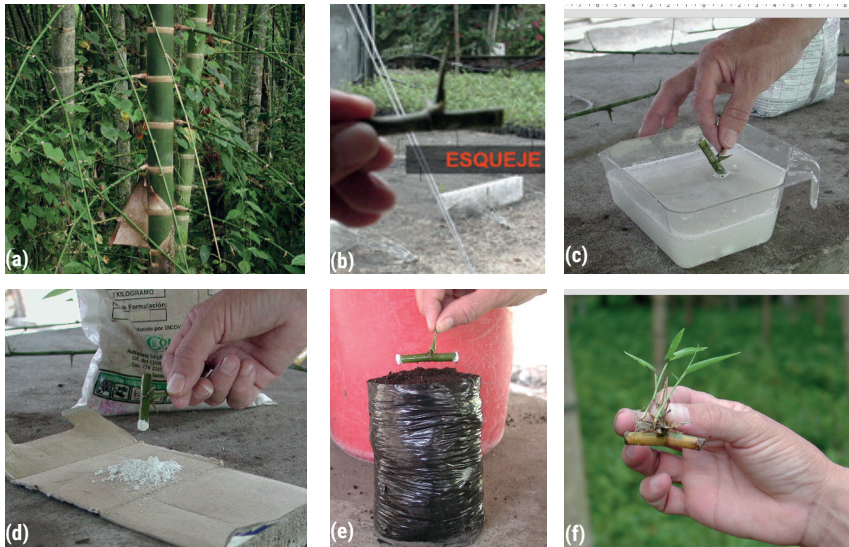


Figura 21. a) Planta madre de *Guadua angustifolia*. b) Explantes acondicionados con yemas semi-diferenciadas c) Desinfección del explante d) Aplicación de enraizador e) Siembra del esqueje f) Esqueje enraizado.

Fuente: Corporación autónoma regional del valle del cauca Oficina de gestión ambiental territorial centro sur. Castaño 2018.

Propagación *in vitro*

El cultivo de tejidos o reproducción *in vitro*, ofrece oportunidades únicas para lograr la conversión de células en plantas enteras. Una de las mayores ventajas es para los taxónomos pues recientemente se ha hallado que plantas de bambú que han crecido bajo las correctas condiciones en cultivo de tejido pueden florecer y producir semilla varios meses después de sembradas en lugar de varias décadas después. Aunque el desarrollo de la técnica de cultivo de tejido, es viable, la necesidad de pruebas de campo y de refinamiento de los procedimientos podrían ser un proceso lento y que consuma

mucho tiempo, pero una vez establecido, el mismo permite la producción masiva de plántulas a una escala industrial.

Disponibilidad de material vegetal y acondicionamiento de explantes

Para realizar la propagación *in vitro* se requiere de material vegetal (explante), para tener estos se toma de la sección media y basal de las ramas primarias, con yemas semi diferenciadas. (Figura 1). Los explantes se cortan con una tijera de podar, previamente desinfectada con alcohol de 96°, cuyas dimensiones son: 0.5 cm hacia el extremo inferior y 2 cm hacia el extremo superior. Almacenar los cortes en un frasco esterilizado (Corrales, 2018).

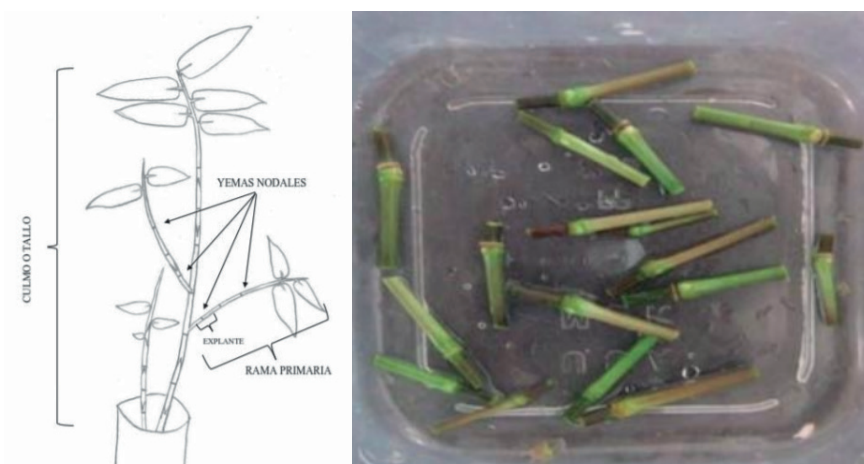


Figura 22. a) Planta madre de *Guadua angustifolia*. b) Explantes acondicionados con yemas semi diferenciadas.

Fuente: Propagación, Manejo y Silvicultura. Revista *Bambucyt*. 01. Corrales, 2018.

8.5 Sistema de riego

Es bueno que las plantaciones de bambú se realicen con las primeras lluvias de las estaciones lluviosas para garantizar la humedad requerida en el suelo para el desarrollo de las plantas. Las plantas adultas pueden resistir un tiempo la inundación o saturación total del suelo, pero las nuevas son relativamente susceptibles tanto a los excesos como a las deficiencias de agua.

8.6 Poda

Las podas se realizan cuando las ramas están maduras (6 a 8 meses). Algunas especies presentan espinas en todo los nodos, es por ello que es conveniente realizar la poda ya que sino dificulta la cosecha de los tallos.

8.7 Tecnología de cosecha

El manejo de bambúes se basa en el desarrollo fisiológico de los grupos. Sobre la base de la fotosíntesis, en el transcurso de la mañana, el bambú comienza a transportar almidón desde las raíces hacia las hojas. Durante el día este proceso está en apogeo, lo que lo convierte en un momento menos ideal para la cosecha. El mejor momento para cosechar bambú es antes del amanecer (entre las 12:00 p.m y las 6:00 a.m). La mayor parte del almidón todavía se encuentra en los rizomas y raíces. Esta manera de cosechar bambú tiene tres ventajas: son menos atractivos para los insectos, son menos pesados para el transporte y secará rápido.

La mejor temporada de cosecha de bambú es después de la temporada de lluvias, cuando el contenido de almidón en la savia de bambú es bajo.

La cosecha de bambú se realiza a diferentes edades de crecimiento de las plantas según los requisitos del producto. Los bambúes cosechados son útiles para hacer diferentes productos de acuerdo a su edad. Por ejemplo, la edad recomendable para la cosecha de productos para usar en la construcción es de 3-5 años, y para usos artesanales, puede cosecharse a una edad más temprana dependiendo de la especie.

8.8 Tala

Las varas de bambú deben cortarse por encima del primer nudo del tallo, a nivel del suelo; se recomienda hacerlo anualmente después de los tres a cinco años de plantados (según la especie) con el fin de mantener la actividad de la planta. Se conoce cuando el bambú empieza a madurar porque tiende a perder brillo y su coloración normal. Al momento de cortarse éste no debe tener rizomas nuevos ni tallos en crecimiento Paucar y Llerena (2019).

El sistema existente de prácticas de tala en bambúes forestales se está trabajando en un Rotación de 3 a 4 años. Los bosques de bambú se dividen en 3 o 4 bloques, y el corte es restringido a un bloque cada año. Incluso en áreas donde las talas no reguladas tienen llevado durante años, descansar durante unos años permite que el grupo de bambú se recupere, de ahí la necesidad de seguir los requisitos de la silvicultura para el desarrollo sostenible de un grupo.

9. Estudio económico

Para el análisis económico se considerará que se adquieren los plantones de bambú procedentes de viveros especializados, la especie referencial es la *Guadua angustifolia* debido a que es la especie de mayor comercialización. En el análisis realizado se considera un periodo de ocho años que consta desde la instalación (año 0) hasta la cosecha (año 7) en forma progresiva. Los costos unitarios son los siguientes:

Tabla 3. Precios unitarios de instalación de plántones de bambú.

AÑO 0				
Actividad	Unidad	Cantidad	Costo Unitario S/.	Costo Total S/.
ADQUISICIÓN DE PLANTONES Y TRASLADO				
Insumos				
Plantones de <i>Guadua angustifolia</i> + 10% recalce	Unidad	224	7	S/1568.00
Sub total de costos 1				S/1568.00
Transporte				
Flete de vivero Satipo a Puerto Maldonado	Flete	224	2	S/448.00
Cargado y descargado	Jornal	2	40	S/80.00
Sub total de costos 2				S/528.00
TOTAL				S/2096.00
LABORES DE INSTALACIÓN				
Establecimiento de Plantación				
Limpieza de terreno maleza suave / si es purma duplica el jornal	Jornal	10	50	S/500.00
Marcado/trazado/Hoyado	Jornal	8	50	S/400.00
Distribución de planta a hueco + abono	Jornal	4	50	S/200.00
Siembra / pendiente < 50°	Jornal	4	50	S/200.00
Recalce	Jornal	1	50	S/50.00
Análisis de suelo/completo	Glb	1	200	S/200.00
Sub total de costos 1				S/1550.00
Abonamiento y herramientas				
Machete	ud	4	9.5	S/38.00
Lampa	ud	4	65	S/260.00
Lima triangular	ud	2	8	S/16.00
Pico	ud	2	23	S/46.00
Wincha 50m.	ud	1	120	S/120.00
Cordel	m	1	20	S/20.00
Insecticida	ml	1	120	S/120.00
Abono NPK (20-20-20)	kilo	5.1	2.5	S/12.76
Compost y/o humus (Saco de 50 kg)	Sacos	16.33	25	S/408.16
Sub total de costos 2				S/1040.92
TOTAL				S/2590.92

Tabla 4. Costo de mantenimiento y manejo silvicultural de bambú/hectárea durante año 0.

Actividad	Unidad	Cantidad	Costo Unitario S/.	Costo Total S/.
Herramientas				
Machete	Unidad	8	9.5	S/76.00
Lima triangular	Unidad	4	8	S/32.00
Sub total de costos 1				S/108.00
Mano de obra				
limpieza y control de malezas/ 3 veces/año	Jornal	24	50	S/1200.00
Sub total de costos 2				S/1200.00
TOTAL PRODUCCIÓN				S/1308.00

Tabla 5. Costo de mantenimiento y manejo silvicultural de bambú/hectárea durante año 1.

Actividad	Unidad	Cantidad	Costo Unitario S/.	Costo Total S/.
MANEJO SILVICULTURAL/LABORES CULTURALES				
Herramientas depreciación 1 año				
Machete	Unidad	2	9.5	S/19.00
Lima triangular	Unidad	2	8	S/16.00
Sub total de costos 1				S/35.00
Mano de obra e insumos				
Limpieza y control de malezas/ 3 veces/año	Jornal	24	50	S/1200.00
Abono NPK - fertilización 1	kg	20.4	2.5	S/51.00
Abono NPK - fertilización 2	kg	20.4	2.5	S/51.00
Abono NPK - fertilización 3	kg	20.4	2.5	S/51.00
Personal para fertilizar	Jornal	18	50	S/900.00
Sub total de costos 2				S/2253.00
TOTAL PRODUCCIÓN				S/2288.00

Tabla 6. Costo de mantenimiento y manejo silvicultural de bambú/hectárea durante año 2.

Actividad	Unidad	Cantidad	Costo Unitario S/.	Costo Total S/.
Herramientas depreciación 1 año				
Machete	Unidad	2	9.5	S/19.00
Lima triangular	Unidad	2	8	S/16.00
Tijera de poda grande	Unidad	4	240	S/960.00
Sub total de costos 1				S/995.00
Mano de obra e insumos				
Limpieza y control de malezas/3 veces/año	Jornal	24	50	S/1200.00
Poda y entresaca de cañas	Jornal	10	50	S/500.00
Abono NPK - fertilización 1	kg	51	2.5	S/127.50
Abono NPK - fertilización 2	kg	51	2.5	S/127.50
Abono NPK - fertilización 3	kg	51	2.5	S/127.50
Personal para fertilizar	Jornal	18	50	S/900.00
Sub total de costos 2				S/2982.50
TOTAL PRODUCCIÓN				S/3977.50

Tabla 7. Costo de mantenimiento y manejo silvicultural de bambú/hectárea durante año 3

Actividad	Unidad	Cantidad	Costo Unitario S/.	Costo Total S/.
Herramientas depreciables a 1 año				
Machete	Unidad	2	9.5	S/19.00
SERRUCHO CURVO	Unidad	2	70	S/140.00
Sub total de costos 1				S/159.00
Mano de obra e insumos				
Limpieza y control de malezas/3 veces/año	Jornal	24	50	S/1200.00
Poda y entresaca de cañas	Jornal	10	50	S/500.00
Abono NPK - fertilización 1	Kg	102	2.5	S/255.00
Abono NPK - fertilización 2	Kg	102	2.5	S/255.00
Abono NPK - fertilización 3	Kg	102	2.5	S/255.00
Personal para fertilizar 3 veces/año	Jornal	18	50	S/900.00
Sub total de costos 1				S/3365.00
TOTAL PRODUCCIÓN				S/3524.00

Tabla 8. Costo de mantenimiento y manejo silvicultural de bambú/hectárea durante año 4.

Actividad	Unidad	Cantidad	Costo Unitario S/.	Costo Total S/.
MANEJO SILVICULTURAL/LABORES CULTURALES				
Herramientas depreciables a 1 año				
Machete	Unidad	2	9.5	S/19.00
Tijera de podar	Unidad	2	40	S/80.00
SERRUCHO CURVO	Unidad	2	70	S/140.00
Sub total de costos 1				S/239.00
Mano de obra				
Marcado y plan de corte	Jornal	5	50	S/250.00
Cosecha selectiva/raleo	Jornal	4	50	S/200.00
Sub total de costos 2				S/450.00
REGISTRO DE PLANTACION FORESTAL – SERFOR				
Alquiler de GPS	Día	1	50	S/50.00
Honorarios para georreferenciación	Día	1	200	S/200.00
Llenado de información	Glb.	1	80	S/80.00
Sub total de costos 3				S/330.00
TOTAL PRODUCCIÓN				S/1019.00

Tabla 9. Costo de mantenimiento y manejo silvicultural de bambú/hectárea durante año 5.

Actividad	Unidad	Cantidad	Costo Unitario S/.	Costo Total S/.
MANEJO SILVICULTURAL/LABORES CULTURALES				
Herramientas depreciables a 1 año				
Machete	Unidad	5	9.5	S/47.50
SERRUCHO CURVO	Unidad	4	70	S/280.00
Motosierra	Unidad	1	1200	S/1200.00
Sub total de costos 1				S/1527.50
Mano de obra				
limpieza de ramas y desrame	Jornal	4	50	S/200.00
Cosecha 5 cañas/planta	Jornal	12	50	S/600.00
Traslado de cañas a caballete y	Jornal	10	50	S/500.00
Sub total de costos 2				S/1300.00
TOTAL PRODUCCIÓN				S/2827.50

Tabla 10. Costo de mantenimiento y manejo silvicultural de bambú/hectárea durante año 6.

Actividad	Unidad	Cantidad	Costo Unitario S/.	Costo Total S/.
MANEJO SILVICULTURAL/LABORES CULTURALES				
Herramientas depreciables a 1 año				
Mantenimiento de motosierra	Glb	1	300	S/300.00
Sub total de costos 1				S/300.00
Mano de obra				
limpieza y desrame	Jornal	5	50	S/250.00
Cosecha 8 cañas /planta	Jornal	20	50	S/1000.00
Traslado de cañas a caballete y almacén	Jornal	10	50	S/500.00
Sub total de costos 2				S/1750.00
TOTAL PRODUCCIÓN				S/2050.00

Tabla 11. Costo de mantenimiento y manejo silvicultural de bambú/hectárea durante año 7.

Actividad	Unidad	Cantidad	Costo Unitario S/.	Costo Total S/.
MANEJO SILVICULTURAL/LABORES CULTURALES				
Herramientas depreciables a 1 año				
Mantenimiento motosierra	Glb.	1	200	S/200.00
Sub total de costos 1				S/200.00
Mano de obra				
limpieza y desrame	Jornal	5	50	S/250.00
Cosecha 10 cañas /planta	Jornal	20	50	S/1000.00
Traslado de cañas a caballete	Jornal	10	50	S/500.00
Sub total de costos 2				S/1750.00
TOTAL PRODUCCIÓN				S/1950.00

Tabla 12. Resumen de costo de producción (S) de bambú en 1 hectárea.

ANÁLISIS DE COSTO DE PRODUCCIÓN DE BAMBÚ EN 1 HECTÁREA									
GASTOS/EGRESOS PROYECTADOS									
	AÑO 0:	AÑO 1:	AÑO 2:	AÑO 3:	AÑO 4:	AÑO 5:	AÑO 6:	AÑO 7:	
RUBRO	Instalación	Limpieza y Manejo	Limpieza y Manejo	Limpieza y Manejo	Limpieza y Cosecha	Limpieza y Cosecha	Limpieza y Cosecha	Limpieza y Cosecha	TOTAL
Plantación de 7x7 m. es decir 204 plantas por ha	S/. 5994.92	S/. 2288.00	S/. 3977.50	S/. 3524.00	S/. 1019.00	S/. 2827.50	S/. 2050.00	S/. 1950.00	S/. 23630
INGRESOS PROYECTADOS									
RUBRO	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7 a más	TOTAL
Plantación de 7 m. x 7 m. es decir 204 plantas por ha	S/. -	S/. -	S/. -	S/. -	S/. 2448.00	S/. 8160.00	S/. 16320.00	S/. 20400.00	S/. 47328
Producción/Planta	0	0	0	0	2	5	8	10	
Producción/ha	0	0	0	0	408	1020	1632	2040	
PrecioPromedio				S/. 6.00	S/. 8.00	S/. 10.00	S/. 10.00		

10. Características energéticas del bambú *Guadua angustifolia* Kunth

El bambú, *Guadua angustifolia* Kunth posee las siguientes características.

Tabla 13. Características energéticas del eucalipto.

Poder calorífico	19.7 MJ/kg	Contenido en C	45.7 ± 0.6 %
Densidad a granel con P15	0.13 t/m ³	Contenido de H	6.0 ± 0.1 %
Porcentaje de cenizas	3.19 %	Contenido en N	0.33 ± 0.05 %
Porcentaje de Volátiles	76.4 ± 0.6 %	Contenido en S	0.15 ± 0.06 %
Porcentaje de carbono fijo	9.3 ± 0.6 %		

11. Conclusiones

En las plantaciones energéticas de bambú se pueden obtener producciones entre 16 y 21 t/ha de materia seca. El precio de mercado se sitúa alrededor de 129.5 \$/t. El coste de la producción se sitúa en 23 630 S/. ha, obteniendo un beneficio de 80 \$/t o 1600.5 \$/ha.

La energía obtenible en las plantaciones equivale a 378 GJ/ha.

Referencias

- Akinlabi, E., Anane-Fenin, K., Akwada, D. (2017). Properties of Bamboo. (eds) *Bamboo The Multipurpose Plant*. Springer International Publishing, Switzerland. pp. 87-149. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56808-9_3
- Bamboo Phylogeny Group [BPG] (2012) An updated tribal and subtribal classification of the bamboos (Poaceae: Bambusoideae). In: Gielis J., Potters G. (eds) *Proceedings of the 9th world bamboo congress*, Antwerp, Belgium, 10–12 Apr 2012, pp 3–27
- Banik, R.L. (2015). Morphology and growth. In: Liese W, Kohl M (eds) *Bamboo: the plant and its uses*. Springer International Publishing, Switzerland, pp 43–87
- Centro de Investigación sobre la Desertificación y Fundación AVSI. (2017). Manual Técnico del Bambú para Productores (*Guadua angustifolia* Kunth). Lima, Perú. 88 p.
- Césare, M.F., Hilario, F., Callupe, N, Cruz,L., Calle, J.L., Gonzales, H. (2018). Caracterización química y física del bambú. *Revista avances en Ciencias e Ingeniería*, 10(4), 1-13
- Guerreiro, C. (2013). Flowering cycles of woody bamboos native to southern South America. *Journal of Plant Research*, 127(2), 307–313. <https://doi.org/10.1007/s10265-013-0593-z>
- Huang, Z. (2019). Application of Bamboo in Building Envelope, Green Energy and Technology. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12032-0_1
- INBAR. International Network for bamboo and rattan. (2013). *Estudio de la cadena desde la producción al consumo del bambú (Guadua angustifolia) en Perú*. Quito, Ecuador. 180 p.
- INBAR. International Network for bamboo and rattan. (2013). *Estudio de la vulnerabilidad del bambú (Guadua angustifolia) al cambio climático en la costa del Ecuador y norte Perú*. Quito, Ecuador. 135 p.
- Liese, W., Kohl, M. (2015). Bamboo, Tropical Forestry 10. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6>
- Londoño, X. (2011). El bambú en Colombia. *Bioteología Vegetal*, 11(3). Recuperado de <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/485/882>
- López, A. (2011). *Bambú: Biología, cultivo, Manejo y usos en el Perú*. Dirección General de la Competitividad Agraria. 3ra. Edición. 68 p.
- Mercedes, J.R. (2006). Guía Técnica Cultivo del Bambú. Santo Domingo, República Dominicana. CEDAF, (2006). 38 p.

- Ortiz, Rodríguez. (2018). Caracterización y clave de identificación de los bambúes en la región nor-oriental (San Martín, Amazonas y Cajamarca). *Revista BAMBUCYT. Bambú para la ciencia, innovación y tecnología*, 01. <https://doi.org/10.18259/nys.2018002>
- Paucar, R., Llerena, L. (2018). Manual técnico de la caña Guayquil (*Guadua angustifolia*): Sistematización de experiencias en la Región Piura.
- Romero, H. (2015). Producción de gas de síntesis (gasificación de bambú). Instituto Nacional de Electricidad y Energía Limpia. *Boletín IIE*. pp 80-85.
- Xu, T.S., Wang, H. (2004). Main pests of bamboo in China. *Chinese Forest Publish House*, Beijing, pp 45-46
- Zhou, C., Wu, XQ., Ji J., Ye, J.R. (2010). Research advances of bamboo diseases. *China For Sci Technol*, 24(5):8-13

Caña de azúcar en Paraguay

Lisa María Lovera-Rivas¹, Hugo Ariel Ramirez-Mereles²

¹Universidad Nacional de Asunción. José F. Estigarribia km 11. Campus de la UNA San Lorenzo, Paraguay

²Viceministerio de Minasy Energía, Ñangapity y Los Rosales, San Lorenzo, Paraguay

*Autor para correspondencia: lisalovera@hotmail.com

1. Caña de azúcar en Paraguay

El cultivo de la caña de azúcar en el Paraguay, es uno de los cultivos de mayor importancia social y económica, debido al área de cultivo y a la cantidad de mano de obra que ocupa.

Según el último Censo Agropecuario Nacional (2008), la superficie cultivada de caña de azúcar alcanza las 100 000 hectáreas, distribuidas en más de 50 000 fincas en todo el país y se cultiva principalmente como materia prima para la producción de azúcar, forraje, aguardiente y alcohol carburante, constituyéndose el etanol de caña en fuente alternativa y renovable de energía para el país.

Nombre científico:	<i>Saccharum Officinarum</i>
Nombre común:	Caña de azúcar
Reino:	<i>Plantae</i>
División:	<i>Magnoliophyta</i>
Clase:	<i>Liliopsida</i>
Subclase:	<i>Commelinidae</i>
Orden:	<i>Poales</i>
Familia:	<i>Poaceae</i>
Subfamilia:	<i>Panicoideae</i>
Tribu:	<i>Andropogoneae</i>
Género:	<i>Saccharum</i>
Especie:	<i>Officinarum</i>

Existen varias especies del *Saccharum*, pero actualmente, todas las variedades utilizadas comercialmente son híbridos de *Saccharum Officinarum*.

En la Figura 1 se puede ver variedades de plantación de caña de azúcar en etapa de crecimiento de este género, ubicada en el Distrito de Guaira, año 2018.



Figura 1. Plantación de caña de azúcar

Morfológicamente se caracteriza por presentar macollos, que son brotes secundarios que se forman a partir de las yemas axilares, ubicadas en los nudos del eje principal. Se propaga en forma asexual por medio de trozos o esquejes que contienen las yemas, donde cada una puede desarrollarse en un tallo primario, que a su vez forma tallos secundarios y terciarios.

Generalmente, el 70% de las raíces se encuentran en los primeros 40 cm de profundidad del suelo y es de consistencia fibrosa.

Los tallos son cilíndricos, erectos, fibrosos y compuestos de nudos y entrenudos, la altura varía desde 1.0 hasta 5.0 m, y el diámetro varía de 1.0 cm a 5.0 cm. La hoja de la caña de azúcar, después de desarrollada, consiste en una lámina y vaina que rodea al tallo, distribuyéndose en forma alternada y opuesta.

En la Figura 2 se puede ver una imagen orientativa de las partes principales de la caña de azúcar.

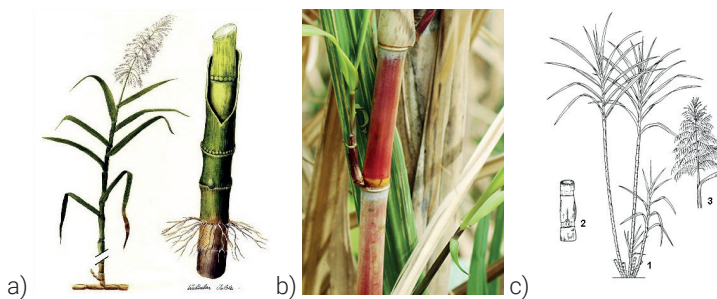


Figura 2. a) Raíz y tallo. b) Tallo. c) Partes de la caña de azúcar – raíz, tallo y hoja.

2. Distribución

La caña de azúcar es un cultivo de renta importante de los trópicos y subtrópicos. Se cultiva en más de setenta países entre los paralelos 36.7° Norte y 31° Sur, desde el nivel del mar hasta altitudes de casi 1000 metros sobre el nivel del mar, abarca aproximadamente la mitad del mundo. En la Figura 3-a se muestra los países de mayor producción de caña de azúcar.

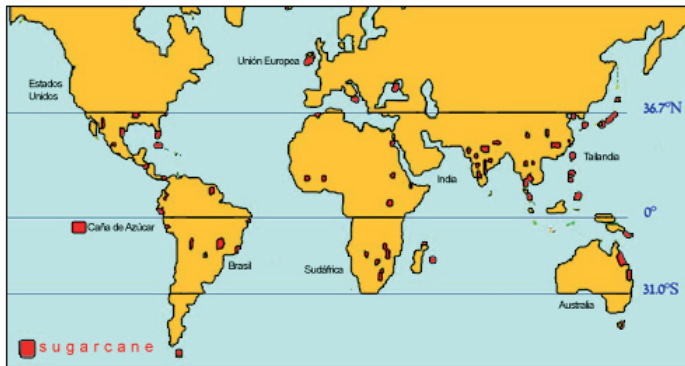


Figura 3-a. Producción de caña de azúcar en el mundo.

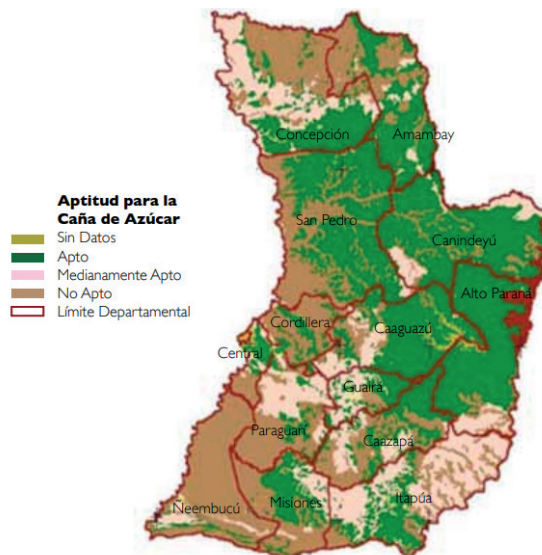


Figura 3-b. Potencial para el cultivo de caña de azúcar en Paraguay.

En el Paraguay los departamentos que más cultivan este producto son Guairá, Paraguairí, Central y Chaco.

En la Figura 3-b, se observa los departamentos altamente potenciales para el cultivo de la caña de azúcar en Paraguay. Las mismas están resaltadas en color verde.



Figura 4. Campo experimental Natalicio Talavera, Departamento del Guaira

Uno de los campos experimentales de Caña de Azúcar, está ubicado en el distrito de Natalicio Talavera, departamento de Guairá (Figura 4) y cuenta con una superficie de 130 hectáreas.

El campo es semillero básico de variedades seleccionadas provenientes de materiales genéticos introducidos al país y evaluados en ensayos competitivos de rendimiento a nivel regional. El mismo es dependiente del Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria (IPTA), y ayuda a ejecutar acciones orientadas a fortalecer la producción de caña de azúcar.

3. Exigencias del cultivo

Las condiciones de suelo y clima en nuestro país son favorables para el cultivo de la caña de azúcar, aunque con algunas variantes, según las zonas. Su mayor inconveniente son las heladas porque afectan las hojas y los tallos tiernos.

3.1 Clima

La caña de azúcar es un cultivo de clima cálido. Los principales componentes climáticos que controlan el crecimiento, el rendimiento y la calidad de la caña son la temperatura, la luz y la humedad disponible.

Temperatura

La temperatura es el principal determinante climático del cultivo de la caña de azúcar, que necesita altas temperaturas. Durante el ciclo de cultivo de la caña de azúcar, se distinguen tres períodos principales: germinación y desarrollo radicular, crecimiento, maduración.

- Germinación y desarrollo radicular: la temperatura óptima para la germinación y el desarrollo radicular va de 26 a 33 °C; si la temperatura cae debajo de 20 °C la germinación y el desarrollo radicular son lentos.
- El crecimiento: la caña de azúcar paraliza su crecimiento cuando la temperatura cae debajo de 15 °C o sube arriba de 38 °C, siendo la temperatura óptima de 30-34 °C.
- Maduración: durante el periodo de maduración, relativas bajas temperaturas resultan en aumento de producción y almacenaje de sacarosa, mientras que el crecimiento de la caña es reducido.

Precipitación

La caña de azúcar necesita un promedio de precipitación de 1.200 a 1.500 mm por año, aunque su requerimiento de agua varía durante su ciclo vegetativo.

- El desarrollo de las raíces sólo ocurre si existe suficiente cantidad de agua y las raíces jóvenes llegan a morir en suelos secos.
- Durante su principal período de crecimiento, cuando la mayor parte de la biomasa es producida, la caña planta necesita una gran cantidad de agua y cualquier deficiencia en agua ocasiona la disminución en el rendimiento.
- Durante el período de maduración, el requerimiento de agua es más reducido, debido a que la sacarosa se almacena sólo cuando la caña detiene su crecimiento.

Luz solar

La caña de azúcar es una planta que se favorece con la presencia del sol. El macollamiento es influenciado por la intensidad y la duración de la radiación solar. Una alta intensidad y larga duración de la irradiación estimulan el macollamiento, mientras que condiciones de clima nublado y días cortos lo afectan negativamente. El crecimiento del tallo aumenta cuando la luz diurna se extiende entre 10 a 14 horas.

En el follaje del cultivo de la caña las primeras 6 hojas superiores interceptan el 70% de la radiación y la tasa fotosintética de las hojas inferiores disminuye debido al sombreado mutuo. Por lo tanto, para una utilización efectiva de la energía radiante se considera como óptimo un valor de 3.0-3.5 de Índice de Área Foliar.

Las regiones en las que el ciclo de crecimiento del cultivo es corto se benefician de un menor espaciamiento entre plantas, para interceptar una mayor cantidad de radiación solar y producir mayores rendimientos. Sin embargo, en áreas con una fase prolongada de crecimiento es mejor tener un mayor espaciamiento entre plantas, para evitar el sombreado mutuo y la muerte de los tallos.

3.2 Suelo

Las propiedades favorables del suelo para el cultivo de la caña de azúcar son:

- Textura: suelo con proporciones adecuadas de los tres componentes, es decir un suelo franco-areno-arcilloso.
- Estructura: granular que facilite su laboreo y capacidad para almacenar agua y un adecuado grado de infiltración.
- Composición mineral: una suficiente cantidad de los cuatro nutrientes minerales calcio (Ca), nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K); además de materia orgánica, como partículas de humus.
- Acidez o alcalinidad: la caña de azúcar tolera valores de pH entre los 5.5 a 8.

Las condiciones ideales de suelo para el cultivo de la caña de azúcar son suelos profundos, alcanzando 80 a 90 cm y buen drenaje natural.

4. Estadios fenológicos

El cultivo de la caña de azúcar en su ciclo de plantilla tiene un desarrollo vegetativo de duración variable, dado a que depende de la variedad y de la influencia del clima.

Variedades por época de maduración:

- Temprana: Abril/Mayo
- Media: Junio/Setiembre
- Tardía: Octubre/Noviembre
- Media Tardía: Julio/Octubre

De la siembra a la cosecha el cultivo puede durar desde 14 y hasta 17 meses. En la Figura 5 se muestra las etapas por la que pasa la caña de azúcar en este periodo: germinación y/o emergencia, amacollamiento o ahijamiento, rápido crecimiento y maduración. En tanto el desarrollo de las socas (segundo corte de la caña) tiene una duración de 11 a 13 meses y se distinguen tres etapas: brotación y amacollamiento, rápido crecimiento y maduración.

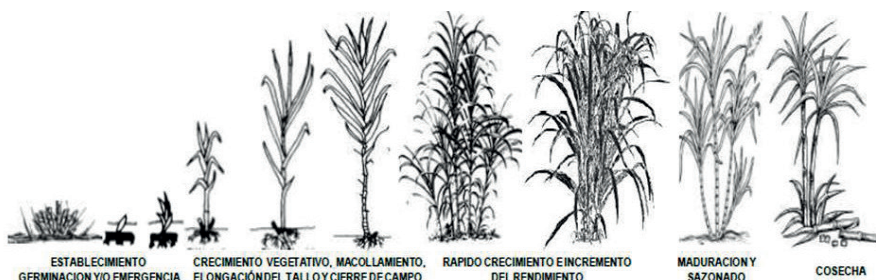


Figura 5. Etapas fenológicas del cultivo de caña de azúcar.

5. Principales enfermedades y plagas

5.1 Plagas

A nivel país, el cultivo se ve afectado por el ataque de diversas plagas, siendo la broca del tallo (*Diatraea saccharalis*) y el Salivazo o mosca pinta (*Aeneolamia* sp.) las más importantes, porque afectan la calidad y el rendimiento industrial de la caña de azúcar.

La broca de tallo, son larvas que atacan los brotes jóvenes causando la muerte de la yema apical. Dañan los tallos abriendo galerías, facilitando la entrada de microorganismos que causan la pudrición de los mismos. (Figura 6).

Tratamiento: Manejo integrado de plagas, control biológico.



Figura 6. Broca de tallo.

Salivazo o mosca pinta, succionan la savia y excretan una sustancia toxica que causa una quemazón en el follaje de la planta, reduciendo así su actividad fotosintética y productividad.

Tratamiento: Aplicación de rastra fitosanitaria, control de malezas, control etológico.

5.2 Enfermedades

Son numerosas las enfermedades que atacan al cultivo de caña de azúcar y que revisten gran importancia por las pérdidas económicas que ocasionan. Pueden ser causadas por virus, bacterias, hongos y nematodos

Carbón

Enfermedad producida por hongo (*Ustilago scitaminea*), en variedades susceptibles puede reducir hasta en un 70% la productividad.

Afecta el meristemo apical de crecimiento y la hoja bandera dando la forma de un "látigo negro". (Figura 7).

Tratamiento: Siembra de variedades resistentes, rastreo y saneamiento sistemático, composición balanceada de cultivares, empleo de semilla certificada, viveros de mudas aislados de los cañaverales comerciales, aplicación de tratamiento térmico, quema de cañaverales severamente infectados antes de la cosecha.



Figura 7. Carbón.

Roya

Enfermedad producida por hongo (*Puccinia melanocephala*), inicia como una peca amarillenta visible a ambos lados de la hoja, las manchas crecen y toman un color pardo rodeado de un halo amarillo formando pústulas en el envés de la hoja. (Figura 8).

Puede reducir el 45% de la productividad.

Tratamiento: Uso de variedades resistentes, combinación balanceada de variedades, eliminar plantaciones muy infectadas, aplicar mecanismos de escape en el tiempo y en el espacio.

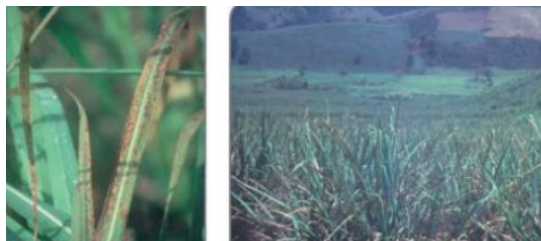


Figura 8. Roya.

Escaldadura

Es una enfermedad bacteriana, ampliamente diseminada en muchos países. Esta enfermedad es favorecida en temporadas húmedas, en condiciones de estrés hídrico producido por sequías y también cuando hay anegamiento y bajas temperaturas. (Figura 9).



Figura 9. Escaldadura.

Tratamiento: Uso de variedades resistentes o tolerantes al patógeno, selección de material sano de siembra, entresaque de material enfermo de los semilleros, desinfección frecuente de la herramienta usada para el corte.

Raquitismo de la soca

Enfermedad producida por bacteria (*Leifsonia xyli*), ocasiona el taponamiento de los vasos conductores retrasando el crecimiento, ocasionando entrenudos cortos y gradualmente reduciendo la población por metro lineal ocasionando pérdidas de hasta el 35%. (Figura 10).

Tratamiento: Termoterapia, sumergir las estacas en agua a 50.5°C por 2 horas para eliminar la bacteria, limpieza de herramientas e implementos agrícolas, plantar cultivares tolerantes, usar semillas de calidad y origen conocida;

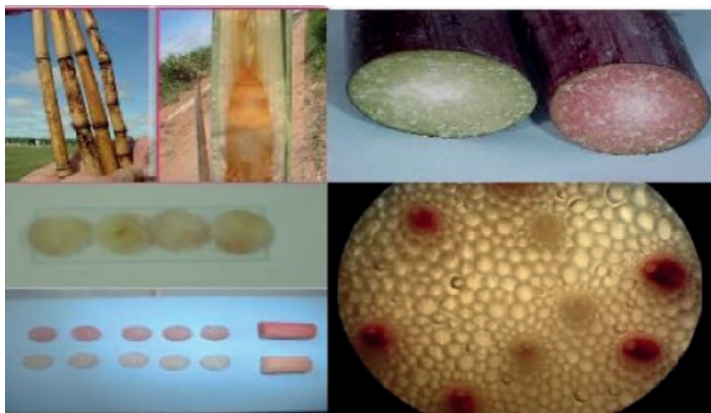


Figura 10. Raquitismo de la soca

6. Técnicas de cultivo

6.1 Preparación del suelo

Se desarrollan tres tipos de prácticas de preparación de suelos para el cultivo:

1. La preparación a tracción animal: involucra una carpida del terreno aproximadamente dos meses antes de la implantación del cultivo, una arada incorporando los residuos vegetales, aproximadamente un mes antes de la plantación y el surcado de plantación (35 cm profundidad), inmediatamente después de la arada.
2. La preparación mecanizada: consiste en general; en una carpida, aproximadamente dos meses antes de la implantación del cultivo; una rastrojada, incorporando las malezas en el suelo un mes antes de la plantación; y una arada (rastrón o arado de discos), incorporando los residuos vegetales, aproximadamente un mes antes de la plantación. Finalmente se hace el surcado para plantación (35 cm de profundidad) con surcadora o arado de discos.
3. La labranza mínima mecanizada sobre barbecho o sobre abono verde: consiste en una carpida o rollo cuchillo aproximadamente un mes antes de la plantación; desecar o carpir la vegetación remanente, aproximadamente una semana después de la carpida de las malezas o los abonos verdes con pre o post emergente (herbicidas); y surcado de plantación con surcadora o arado.

La técnica de labranza mínima es la más utilizada para la preparación de los suelos en Paraguay.

6.2 Plantación

El sistema de plantación manual es el más frecuente realizado en el país, y de reciente difusión y aplicación el sistema mecanizado, ambos sistemas aplican estrategias de fertilización.

Plantación Manual

El sistema chorro doble corrido es el más utilizado para la plantación de la caña de azúcar y consiste en depositar en el surco, en forma corrida y de manera yuxtapuesta (base con ápice) dos cañas, es importante que se entrecrucen las cañas de manera a evitar que quede un espacio vacío que permita una brotación uniforme y buena población de plantas; posteriormente son troceadas (cortadas) en estacas cada dos a tres yemas. (Figura 11).

El sistema de plantación manual evita ocasionar mayores daños, sobre todo en las yemas del material de propagación, por ello es también importante que la caña sea transportada y manipulada con toda la cobertura de su hoja la cual le sirve de protección contra daños que puedan sufrir en el proceso de plantación.

Posterior a disposición y corte en el surco los esquejes de cañas se los pondrán una cobertura de tierra de unos 5 cm de espesor usando para el efecto azada, rastra liviana o tapadora especializada para esa labor.



Figura 11. Trabajos de plantación manual.

Plantación mecanizada

La plantación mecanizada de la caña de azúcar es una práctica reciente e innovadora en nuestro país, habiendo poca experiencia sobre la misma.

Ante la necesidad de incrementar el área de cultivo en gran escala, la poca disponibilidad de mano de obra y buscando reducir los costos de producción, los ingenios azucareros y alcoholeros son los impulsores en la utilización de esta tecnología. Con este sistema de siembra todas las operaciones de surcado, fertilización, distribución de semilla, aplicación de productos químicos y tapado son mecanizados.

Según el tipo de plantadora pueden utilizarse cañas enteras, en cuyo caso el corte de la semilla es manual o se usan cañas picadas.

En las plantadoras de cañas enteras la semilla es alimentada en forma manual por operarios, en algunos casos llevan una carreta adicional donde van los tallos enteros; los cuales son fraccionados momentos antes de ser depositados en los surcos.

La tendencia actual es el desarrollo de plantadoras mecanizadas que utilizan caña picada que son arrastradas por tractores de gran potencia y de acuerdo a su modelo y capacidad pueden abrir uno o dos surcos a la vez. La alimentación de semilla se realiza a través de equipos de cosechadoras (cosechadora misma, jaula transportadora con volquete y tractor) adaptadas para el efecto, pudiendo llegar a plantar 1 ha por hora. En este sistema de plantación la cantidad de caña semilla necesaria se duplica en relación a la manual, llegando a utilizar entre 18 a 20 t/ha.

6.3 Fertilización

La caña es una planta de crecimiento muy vigoroso, por tanto necesita de suficiente cantidad de nutrientes para obtener buenos rendimientos. La fertilización química se realiza fundamentalmente de acuerdo al análisis químico del suelo. En la producción convencional en el primer año se realiza en dos etapas:

1. Fertilización Básica: se aplica en el fondo del surco mezclado con el suelo antes de la plantación. Se recomienda aplicar 300 kg/ha de NPK 10-30-10; o 4-30-10.
2. Fertilización de cobertura: se realiza a los 90 – 120 días después de la plantación, a 15 cm de la hilera, y luego se cubre con el suelo usando azada o cultivadora. Se recomienda aplicar 100 kg/ha de urea y 80 kg/ha de muriato de potasio.

Luego de la cosecha se realiza la fertilización en caña soca o tronco aproximadamente dos meses después de la cosecha, aplicando de la misma forma que la fertilización de cobertura. Se recomienda aplicar 400 kg/ha de 20-05-20 o 300kg/ha de 26-00-26.

Uso de abonos verdes

Abonos verdes: el cultivo de abonos verdes asociado a caña es muy importante por los beneficios que aporta tales como: protege el suelo contra la erosión, aumenta la infiltración y retención de agua en el suelo, reduce su temperatura, evita el encostramiento de la superficie del suelo y reduce el crecimiento de malezas, disminuye la infestación de plagas y enfermedades y además incrementa la cantidad de materia orgánica que se puede incorporar al suelo y beneficiar al cultivo. Por tales motivos se recomienda el cultivo de abonos verdes como la mucuna, la crotalaria, la canavalia, el lupino, entre otros. (Figura 12).



Figura 12. Abonos verdes.

Se recomienda para plantaciones temprana de caña el cultivo de abonos verdes de invierno, como nabo, lupino, avena; siendo más recomendado la mezcla de las tres especies de abonos, y sembrarlos a los 60 días después de la plantación de la caña para evitar competencia.

En plantaciones de julio a setiembre se recomienda la siembra de abonos verdes de verano, como crotalaria, canavalia, entre otros, así mismo sembrarlos a los 60 días después de la plantación de la caña de azúcar.

Fertilización orgánica

Durante las tareas de laboreo se puede distribuir e incorporar al suelo la materia orgánica como estiércol, compost o residuos industriales (torta de filtro), según la disponibilidad y el costo

Tabla 1. resumen de labores agronómicas para producción de caña de azúcar.

Actividades	Año				
	1	2	3	4	5
Preparación de suelo					
Arada	X				
Rastreada	X				
Aplicación de fertilizante cal agrícola	X				
Aplicación de fertilizante NPK	X				
Surcado	X				
Plantación	X				
Cuidados culturales					
Aplicación insecticidas	X	X	X	X	X
Aplicación de herbicidas	X	X	X	X	X
Desmalezado mecánico		X	X	X	X
Acondicionamiento de rastrojos, desaparque, otros		X	X	X	X
Aplicación de fertilizante NPK		X	X	X	X
Aplicación de fertilizante estiércol		X	X	X	X
Aplicación de vinaza	X	X	X	X	X
Cosecha					
Corte					X
Transporte a la planta de procesamiento	X	X	X	X	X

7. Estudio económico

Los costos de producción de la caña de azúcar han ido aumentando significativamente año tras año. Esto se debe principalmente al aumento de los costos de mano de obra y fletes.

El aumento de los costos fue acompañado por el aumento progresivo de los precios. Estos precios en el mercado nacional han tenido una proyección en constante aumento.

Aunque Paraguay presente condiciones favorables para su cultivo debido a su situación geográfica, tipos de suelos y características climáticas, el rendimiento sigue siendo bajo en comparación con otros países productores, siendo por tanto, una oportunidad para el país producir y satisfacer la demanda local.

El costo de producción de la caña de azúcar para la zafra 2009/2010 estuvo en aproximadamente 1000\$/ha. Actualmente, la cifra alcanza a 4.000 hasta 5.600 \$/ha. dependiendo del método de producción utilizado.

En la siguiente tabla se puede observar el resultado de análisis de costos de producción realizado dentro del proyecto: 14-inv-122¹.

Tabla 2. Costos de producción de cultivo de caña de azúcar en base a 1 ha.

Concepto	Costo de plantación (\$/ha)	Mantenimiento, 5 zafas (\$/ha)
Labores	1.750	3.200
Insumos	550	
Total A + B	2300	3.200
Costo Total	5500 \$/ha	

Dentro de las labores incluye; análisis de suelo, limpieza, aplicación de fertilizantes, surcada, plantación, carpida, cosecha. Insumos incluye; fertilizantes, semilla de caña dulce, flete de caña, semilla de abonos verdes.

Rendimiento

El rendimiento promedio del Paraguay es de aproximadamente 70 toneladas por hectárea tanto para pequeños o grandes productores. Sin embargo en proyectos experimentales, con la implementación de nuevas tecnologías se ha logrado alcanzar en promedio una productividad de 120 toneladas por hectárea.

Precio de venta

Actualmente, el precio de la caña de azúcar es de aproximadamente 30 \$/t.

8. Características energéticas

Tabla 3. Composición general de la caña de azúcar.

Poder calorífico	19.000 MJ/t.
Sacarosa	13%
Impurezas (no sacarosa)	2%
Agua	70%
Fibra (Materia insoluble)	15%

9. Conclusiones

La producción de caña de azúcar en Paraguay es cada vez más importante, teniendo en cuenta el crecimiento en el área de cultivo, su productividad, incentivo a la agricultura familiar y posibilidades de la producción de Etanol a nivel industrial.

El proceso de producción y uso de los biocombustibles en Paraguay se centra en el etanol, producido a base de caña de azúcar, es un sector con historia en el país que actualmente se desarrolla prácticamente solo gracias al incentivo generado por la Ley 2748/05 de corte obligatorio de naftas.

La producción de biocombustibles en Paraguay se destina principalmente al mercado interno, el país es auto productor, una pequeña parte del etanol es exportada a países como Brasil, Uruguay, Chile.

La demanda de etanol ha presentado un incremento considerable en los últimos años. El aprovechamiento de las condiciones de suelo y clima del Paraguay para el cultivo de la caña de azúcar, presenta grandes beneficios, para la diversificación de la matriz energética Paraguaya, así como beneficios económicos, sociales y ambientales.

Referencias

- Duarte, O., Gonzalez, J. (2019). Guía técnica. Cultivo de caña de azúcar.
- Espinoza, F. (2019). Manual técnico. Caña de azúcar.
- FAO-MAG. (2018). Sostenibilidad de la biomasa forestal para energía y del etanol de maíz y caña de azúcar en Paraguay.
- SAGARPA. Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. (2015). Ficha técnica del cultivo de la caña de azúcar.

Internet

- www.ssme.gov.py
- www.mag.gov.py
- www.mic.gov.py
- www.ipta.gov.py
- www.petropar.gov.py
- www.agr.una.py
- www.abc.com.py

Producción forestal en la Mesopotamia Argentina: situación actual y potencialidades en el uso de la madera como fuente energética

Julian Alberto Sabattini^{1*}, Bruno Dalla Costa², Daian Francia³, Agustina Beti Dallava⁴

¹Ecología de los Sistemas Agropecuarios. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Entre Ríos. Ruta 11 km 10.5 – Oro Verde, Entre Ríos, República Argentina.

²Facultad de Ingeniería Química. Universidad Nacional del Litoral. CONICET Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica. República Argentina

³Facultad de Ciencias Agropecuarias (UNER) República Argentina

⁴Ingeniera Agrónoma. Profesional independiente.

*Autor para correspondencia: julian.sabattini@fca.uner.edu.ar

1. Contexto mundial y regional de la forestación en la Mesopotamia Argentina

En el Acuerdo de París, firmado en abril 2016, dentro del marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se establece que la forestación es una actividad destacada que contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La forestación fija carbono, mientras que la deforestación de bosques naturales realiza exactamente lo contrario. Los bosques en el mundo almacenan aproximadamente más de 650 000 millones de toneladas de carbono, de los cuales el 44% corresponde a la biomasa en pie, 11% a la madera muerta y hojarasca, y un 45% al suelo. Las estimaciones del año 2010 indican que el área total de bosques del mundo oscila los 4000 millones de hectáreas, equivalente a un promedio mundial de 0.6 hectáreas de bosque *per cápita*. La distribución es heterogénea, y se conforma por los cinco países que concentran la mayor riqueza forestal (53%): Federación de Rusia, Brasil, Canadá, Estados Unidos de América y China.

Teniendo en cuenta el contexto regional, la cubierta forestal de América Latina y el Caribe en el año 2005 era de 924 millones de hectáreas, correspondientes al 46% de la superficie terrestre total de la región y al 23% del área forestal total del mundo. Dentro la región el 90% del área forestal se encuentra en América del Sur, el 9% en América Central y México y sólo 1% en el Caribe. Los cinco países con mayor cubierta forestal son el Brasil (477.7 millones de hectáreas), el Perú (68.7 millones), México (64.2 millones), Colombia (60.7 millones) y Bolivia (58.7 millones) constituyendo un total de 730 millones de hectáreas (79% del área forestal total). La cubierta forestal en esta región continúa decreciendo. La pérdida neta anual durante el período 2000–2005 asciende a 4.7 millones de hectáreas, lo que corresponde al 65% de la pérdida neta mundial anual. El Brasil es el país que reporta la más alta pérdida de cubierta forestal en el mundo con 3.1 millones de hectáreas anuales. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que los datos de deforestación para el Brasil y otros países de la región se refieren a la deforestación bruta sin tomar en cuenta que parte de las áreas deforestadas se han regenerado y convertido nuevamente en bosques.

Por otro lado, se registraron alrededor de 13.1 millones de hectáreas de bosques plantados, que representan sólo un 1.4% del área total de bosques en la región y el 9.4% de los bosques plantados mundiales. La tasa anual de reforestación y forestación para el año 2000 en la región se estimó en unas 622 mil hectáreas, contribuyendo al crecimiento de la superficie de los bosques plantados. La mayor oferta de la madera proveniente de este subsector ha triplicado su consumo en los últimos 20 años, sustituyendo en muchos casos el uso de la madera proveniente del bosque natural. Cabe señalar que América del Sur concentra la mayoría de los bosques plantados de la región, principalmente el Brasil, Chile, la Argentina y el Uruguay, que juntos poseen cerca de un 88% del total de la superficie de bosques plantados de la región (FRA, 2005). Las especies más desarrolladas corresponden a los pinos (*Pinus* spp.), eucalipto (*Eucalyptus* spp.) y pino Paraná (*Araucaria angustifolia*). Las políticas de estímulo a la forestación, particularmente en el Cono Sur, mediante incentivos gubernamentales, el crecimiento de las inversiones privadas de los segmentos de pasta, papel, la siderurgia y la reducción de la oferta de madera de bosques naturales han facilitado el desarrollo de este subsector en las últimas décadas.

La política forestal en la República Argentina depende de dos organismos estatales diferentes. Las plantaciones forestales se encuentran bajo el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP) a través de su Dirección de Producción Forestal (DPF); mientras que los bosques nativos son gestionados por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (SAYDS), a través de su Dirección de Bosques (DB). En el marco del MAGyP también se encuentra el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) que es un organismo autárquico enfocado en desarrollar acciones de investigación e innovación tecnológica en las cadenas de valor, regiones y territorios para mejorar la competitividad y el desarrollo rural sustentable del país. Las proyecciones de demanda de madera (World Wildlife Fund), estiman que el equilibrio entre el consumo de madera y una tasa de deforestación nula se logra forestando cerca de siete millones de hectáreas por año. Para ello, Argentina podría contribuir ya que cuenta con un alto potencial para crecer en forestaciones de alta productividad. Estimaciones indican que posee alrededor de 20 millones de hectáreas de tierras con aptitud forestal potencial (Braier, 2004). Actualmente el

patrimonio forestal implantado no supera 1.3 millones de hectáreas. De esta superficie, cerca del 40% de estas plantaciones se encuentran certificadas por sellos de gestión sostenibles, como son la certificación de Gestión Forestal FSC (Forest Stewardship Council) y PEFC (Programa para el Reconocimiento de Certificación Forestal). Estas plantaciones proveen materia prima al 95% de las industrias de base forestal del país, que incluyen alrededor de 2.700 PyMES que emplean en forma directa cerca de 100.000 personas. En 2017, según el INDEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos), el valor bruto de la producción (VBP) alcanzó los US\$14.000 millones, equivalente al 7.3% del valor agregado industrial. De las exportaciones, el papel representaba el 33% del total, seguido por la pasta de madera con 21%, madera y sus manufacturas (20%), productos gráficos (7%), muebles (1%) y otros subproductos.

A nivel nacional, se fomenta la instalación de plantaciones forestales mediante aportes económicos no reintegrables y beneficios fiscales, a través de la Ley N° 25.080 de Inversiones para Bosques Cultivados, prorrogada y modificada por la Ley N° 26.432, siendo la Autoridad de Aplicación la Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca (SAGyP) del MAGyP. Asimismo, beneficia la instalación de nuevos proyectos foresto-industriales y las ampliaciones de los existentes, mediante beneficios impositivos e importes para el manejo sostenible, mientras exista el compromiso de aumentar la oferta maderera a través de la generación de nuevas plantaciones. El actual Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca del Gobierno Nacional informa anualmente bajo licencia Open Data Commons, los resultados del Inventario Nacional de Plantaciones Forestales desde el año 2006. Este organismo es responsable de la actualización de las bases de datos relacionados con las series de precios para diferentes especies forestales y destinos, como así también la producción total de rodales y cortinas forestales, superficies implantadas y extracciones.

Por otro lado, recientemente se elaboró un programa denominado "ForestAR 2030", que es una iniciativa de la Argentina aumentar la producción forestal de manera sustentable. Este programa es liderado por la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable y también es impulsada por la Secretaría de Agroindustria, Ministerios de Producción y Trabajo, Salud y Desarrollo Social, Educación, Cultura, Ciencia y Técnica, con la colaboración de *The Nature Conservancy Argentina* (TNC). La iniciativa tiene como objetivo alcanzar los compromisos asumidos por el País en el Acuerdo de París y la Agenda 2030 a partir del desarrollo de una economía forestal que impulse el desarrollo social, económico y ambiental. La forestación es una de las principales soluciones naturales y de bajo costo para mitigar el cambio climático y permite también dar cumplimiento a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Según datos oficiales, Argentina cuenta con 26.589.000 hectáreas de tierras forestales, que incluyen diversas formaciones como selvas y bosques de clima templado frío y cálido, y 1.120.411 hectáreas de bosques cultivados, predominando las forestaciones de pinos, eucaliptos, sauces (*Salix* sp.) y álamos (*Populus* sp.), de las cuales el 80% se concentra en la Mesopotamia (provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos) y el delta del río Paraná (Figura 1).

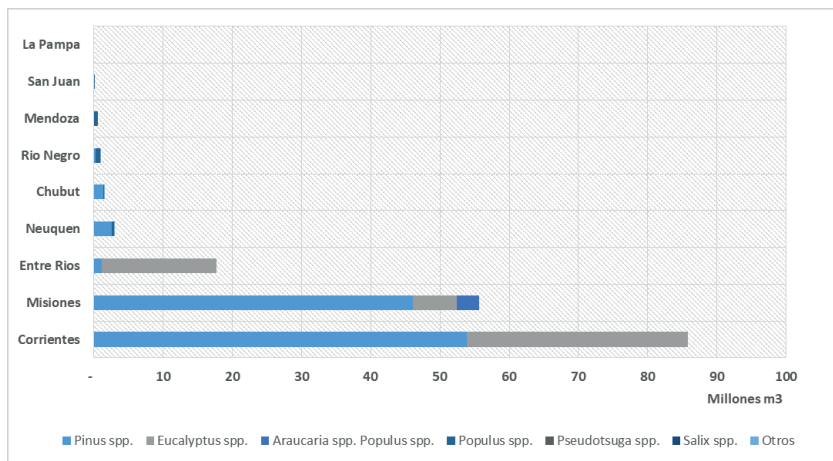


Figura 1. Producción total de los géneros de especies forestales más importantes en las provincias de la República Argentina.

La producción forestal de Argentina está dominada por género *Pinus* spp. (64%), acompañada por especies del género *Eucalyptus* spp (33%). El 3% restante está conformada por especies de los géneros: *Araucaria*, *Populus*, *Pseudotsuga*, *Salix* entre otras especies (Figura 2).

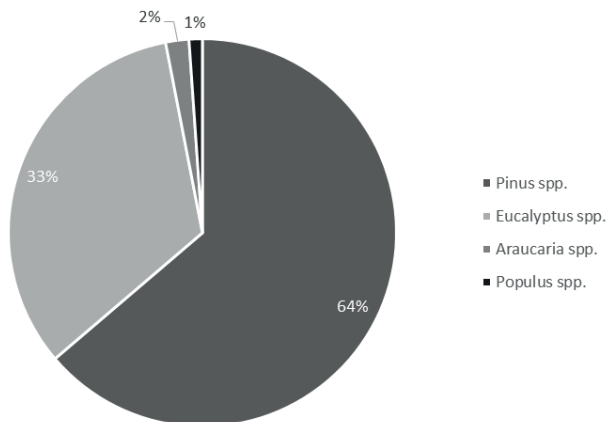


Figura 2. Distribución porcentual de la producción forestal en la República Argentina según los géneros de especies forestales dominantes.

La Mesopotamia es en la actualidad la región de mayor concentración de bosques cultivados, donde predominan las coníferas. Sin embargo, en la provincia de Buenos Aires, las forestaciones son de eucaliptos, pinos, y álamos en seco; mientras que en el delta del

río Paraná predominan álamos y sauces. Por otra parte, la región de la Patagonia Andina (oeste de las provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut) se especializa en el cultivo de pinos. En la región del Noroeste Argentino (provincias de Salta, Jujuy y Tucumán) hay bosques cultivados de pinos y eucaliptos, en tanto en la región de Cuyo (provincia de Mendoza) y en el Valle de Río Negro (provincias de Río Negro y Neuquén) se encuentran las más extensas forestaciones de álamo bajo riego con fines de protección. En la región Chaqueña (provincias de Formosa, Chaco y Santiago del Estero) se localiza la mayor superficie de plantaciones con especies nativas del género *Prosopis*.

En la Figura 3 se observa la distribución espacial de la producción total por distritos de la Mesopotamia Argentina de las especies de eucaliptos y pinos, siendo las dominantes en la producción forestal de la región.

El 65% de las forestaciones del país corresponde a especies de coníferas, fundamentalmente *Pinus elliottii* y *P. taeda* y en menor medida otras especies. Aproximadamente un 22% de los bosques cultivados corresponde a los eucaliptos, siendo el *Eucalyptus grandis* y el *E. saligna* los más plantados; en menor medida *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. viminalis* y *E. globulus*. Las salicáceas representan por su parte alrededor del 9% del bosque implantado, diferentes clones de *Populus deltoides* y *Populus x euroamericana* son los cultivares más representativos entre los álamos plantados. En relación a los sauces se destacan el *Salix babylonica* var. *sacramenta*, *S. nigra* y los híbridos *S. babylonica* x *S. alba* y *S. matsudana* x *S. alba*. Sólo el 4% restante está conformado por especies latifoliadas como *Grevillea* sp., *Paulownia* sp., *Melia* sp., *Robinia* sp., *Prosopis* sp. y *Toona* sp.

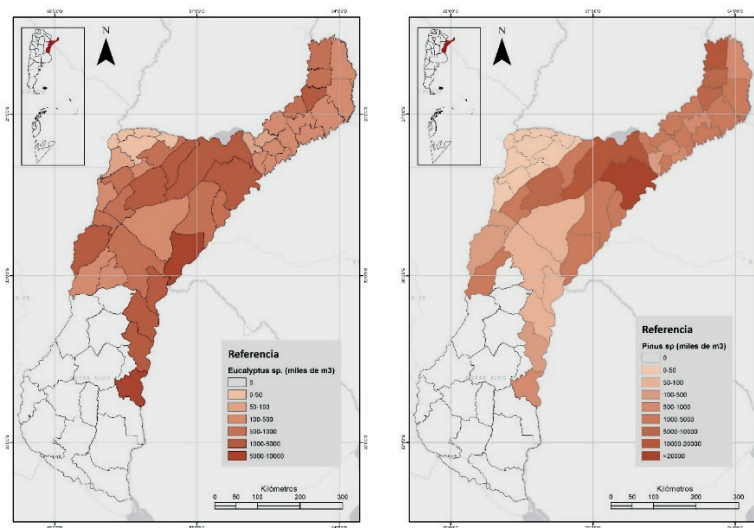


Figura 3. Distribución espacial de la producción de eucaliptos y pinos en la Mesopotamia Argentina.

1.1. La Mesopotamia como potencial

La región Mesopotámica está integrada por las Provincias de Entre Ríos, Corrientes y Misiones con sus correspondientes cabeceras administrativas, las ciudades de Paraná, Corrientes y Posadas. En ella se asientan 3 053 000 habitantes que equivalen al 8.4% de la población total nacional. Como su nombre lo indica, la región se encuentra bordeada en todo su perímetro por ríos; en este caso el Uruguay, Paraná, Iguazú, San Antonio y Pepirí Guazú. De tierras fértiles, sus recursos económicos se basan primordialmente en la explotación forestal y sus industrias derivadas (aserraderos, celulosa y papel), y en menor medida en la agricultura (destacándose la actividad citrícola, hortícola y yerbatera) y ganadería (especialmente la vacuna). Ciertas características topográficas y climáticas colocan a la mesopotamia en una situación de privilegio respecto a otras zonas del país en lo que a la actividad forestal atañe.

Las condiciones naturales de los suelos, su profundidad y un régimen de lluvias favorable, constituyen algunos de los factores que explican dicha primacía. Se verifica así, una tasa de crecimiento de las especies arbóreas más acelerada que en otras regiones; llegando incluso a reducirse a la mitad, en comparación con los países madereros del hemisferio norte, el tiempo necesario para el crecimiento de las coníferas. El clima otorga una situación propicia para la consolidación de la actividad, siendo cálido subtropical sin estación seca en el norte de la mesopotamia y templado pampeano en el sur. La localización es otro factor de incidencia, dada la cercanía con importantes centros urbanos-industriales, que absorben, en términos comerciales, un porcentaje considerable de los productos madereros. La ubicación geográfica permite disponer de una red ferroviaria que la vincula con los distintos puertos de la zona facilitando la exportación de la producción.

Desde el punto de vista forestal puede observarse el nivel de desarrollo durante los últimos 20 años, teniendo en cuenta el aumento sostenido de la producción de las especies maderables de la región (Figura 4).

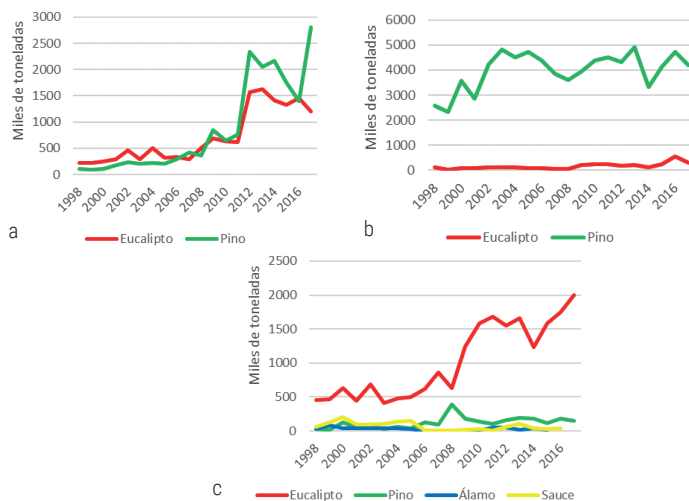


Figura 4. Evolución de la producción anual (mil de toneladas) de los géneros forestales más representativos de la provincia de Corrientes (a), Misiones (b) y Entre Ríos (c) durante el período 1998-2018.

2. Descripción de las especies más representativas de la región

Teniendo en cuenta la distribución de las especies que se desarrollan en la Mesopotamia Argentina, a continuación, se menciona sintéticamente los aspectos botánicos, ecológicos y productivos de las especies más forestadas.

2.1. Género *Eucalyptus* sp.

Es un género de árboles de la familia de las mirtáceas. Existen alrededor de 700 especies, la mayoría oriundas de Australia y Nueva Guinea. En la actualidad se encuentran distribuidos por gran parte del mundo y debido a su rápido crecimiento, frecuentemente se emplean en plantaciones forestales para la industria papelera, maderera o para la obtención de productos químicos, además de su valor ornamental. La mayoría de los eucaliptos no toleran las heladas, o toleran ligeras heladas de hasta -3°C a -5°C .

2.1.1 *Eucalyptus globulus* Labill.

Es una de las primeras especies del género en ser descrita y conocida en el mundo. Se reconocen cuatro subespecies que algunos autores elevan a la categoría de especie: *globulus*, *maidenii*, *bicostata* y *pseudoglobulus*, todas ellas originarias de Tasmania y Australia donde se pueden encontrar más de 300 especies del género (Figura 5). Vulgarmente se lo llama eucalipto blanco, común o azul. *Eucalyptus globulus* ssp *globulus* es originario de la zona este, sudeste y pequeñas áreas de la costa oeste de Tasmania, así como de las islas del estrecho de Bass y en el sur de Victoria, Australia (Balmelli, 1995). Se combinan allí lluvias periódicas en invierno con veranos frescos y secos, con una temperatura máxima media del mes más cálido entre 20°C y 23°C , mientras que la mínima media del mes más frío varía entre los 0°C y los 8°C . En la región de origen ocurren entre 5 y 40 o más heladas al año, y la precipitación media anual oscila entre 600 y 1400 mm con un régimen invernal a uniforme (Marcó et al., 2000). Fue distribuido en áreas templadas del mundo entre los años 1800 y 1850. En Argentina su introducción habría sido en la década de 1850, encontrando las mejores condiciones ecológicas para su cultivo en la zona del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Pathauer, 2005), por sus similitudes con las áreas de dispersión natural.

Desde el punto de vista botánico, es una especie perennifolia que crece generalmente hasta 30 ó 55 metros de altura. Posee un fuste recto cuando los ejemplares crecen en plantaciones, mientras que helicoidal cuando son árboles aislados. La corteza es de color gris, persistente en la base y se desprende en el resto del tronco en largas fajas longitudinales (Figura 5). La hoja tiene un dimorfismo, las juveniles son glaucas, sésiles, opuestas y dispuestas en tallos cuadrangulares; mientras que las adultas son pecioladas, alternas, falcadas y acuminadas, con nervio central marcado, semi coriáceas, de 10-20 cm de largo. Las hojas poseen numerosas glándulas productoras de aceites esenciales. Las flores son bisexuales de color blanca, generalmente solitarias en las axilas de las ramas superiores. Forman el operáculo que se cae en la floración, dejando al descubierto un elevado número de estambres de color cremoso claro muy vistosos. El fruto es una cápsula leñosa, dehiscente por cuatro o cinco valvas anchas y triangulares, semillas negras, angulosas de 2-2.5 mm de diámetro.

Desde el punto de vista ecológico, prefiere inviernos con clima húmedo (precipitaciones periódicas) y veranos frescos, preferentemente secos. Los rangos de temperaturas óptimas son de 20°C a 23°C la máxima media, y la temperatura media mínima puede variar entre los 0°C y 8°C. Heladas de -2°C lo afectan cuando crece en lugares secos y continentales, aumentando su resistencia al frío con el aumento de la edad. Tampoco resiste veranos prolongados y de altas temperaturas. Esta especie requiere para un normal desarrollo suelos profundos, bien drenados, no salinos ni alcalinos, de textura franco arenosa a franco arcillosa (Pathauer, 2005). Es una especie heliófila, pionera y sensible a la competencia, lo cual es necesario el control de las malezas antes de hacer la plantación y durante los primeros años de vida de la misma. Por la rapidez en el crecimiento, se puede encontrar cultivado en muchas regiones del mundo para la producción de madera, fabricación de pulpa de papel y obtención de aceite esencial. También es utilizado para sanear zonas pantanosas, particularmente para eliminar la humedad de las mismas con la consiguiente erradicación de sus plagas de insectos como mosquitos, y de las enfermedades que transmiten. Su uso ha supuesto una gran ayuda para el control del paludismo en muchas zonas de Asia, América del Sur y el sur de Europa. Por otra parte, esta capacidad de absorción del agua convierte a los eucaliptos en especies muy agresivas para el medio ambiente al transformar los ecosistemas por desecación de la tierra donde se plantan.

Eucalyptus globulus es considerada la mejor especie maderera destinada a la fabricación de papel (Ferrere et al., 2005), sin embargo, es apta para otros usos con mayor valor agregado. En España y Portugal se producen chapas decorativas, toneles, muebles y pisos. Las altas densidades de plantación utilizadas en la zona del sudeste bonaerense, sumadas a la escasa difusión de las actividades de poda y raleo, son consecuentes con el principal destino productivo, es decir, madera para molienda. Otros usos pueden ser: pisos, tarimas, vigas laminadas, tableros de listones, tableros MDF, terciados y aglomerados, tablas, andamios, mangos para herramientas o eventualmente, durmientes impregnados (Di Marco, 2015). Los incrementos medios anuales para la región están en torno de los 25-30 m³.ha⁻¹.año⁻¹, y los turnos de corta final se estiman en 10-12 años.



Figura 5. Plantaciones de *Eucalyptus globulus* (izquierda) y *E. grandis* (derecha).

2.1.2. *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden

Especie nativa de las zonas costeras y montes subcosteros de Newcastle y Nueva Gales del Sur en dirección al norte hacia Bundaberg, en Queensland central, con poblaciones discontinuas más al norte cerca de Mackay, Townsville y Daintree, y al norte de Queensland, principalmente en terrenos planos con pendientes más bajas (Figura 6). Comúnmente es una especie conocida como 'eucalipto rosado'. Los suelos donde se desarrollan corresponden a limos aluviales muy fértiles, y la precipitación anual varía de 1.100 a 3.500 mm (Boland et al., 2006). Es el árbol dominante en los bosques húmedos y en los márgenes de las selvas tropicales. Las forestaciones de eucaliptos en Argentina con fines comerciales datan de la primera mitad del siglo XX, pero *E. grandis* adquiere importancia durante la segunda mitad del siglo (Di Marco, 2014). La mayoría de las plantaciones de la Mesopotamia Argentina (Corrientes y Entre Ríos) corresponden a esta especie.

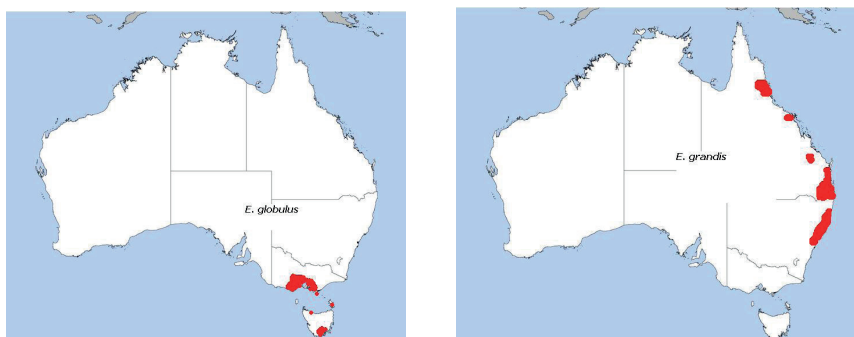


Figura 6. Localización de la distribución natural de *E. globulus* (izquierda) y *E. grandis* (derecha).

En condiciones ecológicas óptimas puede crecer hasta los 60 metros de altura, con diámetros de hasta 2 metros. Su fuste es recto y de buena forma, constituye entre dos tercios a tres cuartas partes de la altura del árbol. La copa es amplia cuando crece en sitios abiertos y reducida en plantaciones densas. Es un árbol de corteza suave y quebradiza, fibrosa en la base del árbol y de color gris claro. Con la altura va tornándose blanca o verde azulada, lisa, y se desprende en tiras largas. Las hojas están dispuestas de manera alterna en las ramas, horizontales o colgantes, de peciolo delgado y cortos, lanceoladas, de borde entero. Las mismas son lustrosas de color verde oscuras en el haz y más pálidas en el envés, con un tamaño entre 10 a 16 cm de largo y 2-3 cm de ancho. Las flores son perfectas, de color blanca, que aparecen a partir de mediados de otoño hasta finales de invierno, y están dispuestas en umbelas de 5 a 12 flores. Los frutos son pequeños, leñosos y carnosos, en forma de cono de unos 8.5 mm de largo y 7.4 mm de ancho, llamados cápsulas. Las semillas son muy pequeñas pudiendo contener hasta 2.5 millones por kilogramo.

Crece bien en suelos altos y profundos, disminuyendo su productividad en suelos bajos y superficiales. Siendo los suelos más adecuados para su cultivo los arenosos rojizos y pardos o aquellos limos aluviales muy fértiles. En suelos bajos con déficit de drenaje, se pueden plantar realizando camellones, práctica que permite aumentar la

superficie de dispersión en la Argentina (Aparicio et al., 2005). Es una especie sensible a las bajas temperaturas. Se caracteriza por su hábito de desramarse en forma espon-tánea, lo cual no excluye la necesidad de poda, dando origen a fustes lisos con aspecto columnar. Cuando las condiciones del clima y suelo son adecuadas, esta especie presenta un índice de crecimiento superior a cualquier otra especie del género. Al igual que *E. globulus* es una especie sensible a la competencia por recursos durante los dos primeros años. La poda y el raleo son prácticas indispensables para obtener madera de calidad, con mayor diámetro y libre de nudos que serán destinados a aserrados o laminados. Una práctica muy común en esta especie es el manejo del rebrote luego de la tala rasa, sin embargo, la replantación permite obtener plantaciones mas homogéneas, características mas deseables de forma del fuste y niveles altos de producción por unidad de superficie. Por otro lado, es una especie apropiada para integrar sistemas silvopastoriles, dado que su estrecha copa permite la llegada de la luz hasta el nivel del suelo permitiendo el crecimiento del pastizal natural. Las tasas de crecimiento en la Argentina de esta especie son entre 35 a 50 m³·ha⁻¹·año⁻¹, situándose entre las mas altas del mundo. En sitios de excelente aptitud y con buena práctica silvícola se esperan incrementos medios superiores a 60 m³·ha⁻¹·año⁻¹. El turno de corte es variable, entre 8 a 15 años de edad según los objetivos y los sitios de plantación.

Es una especie muy demandada fuera de Australia por su calidad en la madera y como pasta celulosa, existiendo plantaciones extensivas en Sudáfrica, Brasil y Sri Lanka (Sivananthwerl y Mitlohner, 2011). Dentro de Australia, hay plantaciones en el norte de Nueva Gales del Sur, donde las plántulas pueden alcanzar 7 metros de crecimiento en su primer año (Holliday, 1989). La madera tiene un color rosado y se utiliza en carpintería para pisos, construcción de barcos, paneles y contrachapados. Tiene una fibra recta de moderada durabilidad y fuerza. Los híbridos con el eucalipto rojo (*Eucalyptus camaldulensis*) se utilizan para combatir la salinidad (Wrigley y Murray, 2010). Una particularidad de los eucaliptos es que, debido a su grano, textura, contracción y el uso frecuente de madera sin secar, no son maderas muy fácilmente trabajables, aunque con el empleo de técnicas adecuadas pueden lograrse muy buenos productos. En general los problemas son mayores en los eucaliptos más pesados (colorados), siendo los más livianos los más fáciles de trabajar destacándose *E. grandis*. Es importante mencionar que la pureza varietal es crucial, dado que origina inconvenientes en la calidad de la madera como rajaduras y torceduras. Esta especie se destaca por su facilidad de aserrado, teñido, torneado, clavado y encolado.

A nivel mundial el *E grandis* se ha destinado principalmente para celulosa y energía, y en menor medida para tableros y postes para transformación mecánica (aserrado o laminado para compensados). Su aptitud celulósica es importante, aunque presenta un duramen amarillo-rosado con bajo contenido de taninos respecto a los eucaliptos de madera pesada. En Argentina los destinos más importantes son la industria del aserrado para usos rústicos como tablas o tirantes para encofrados en la construcción, cajonería, pallets, embalajes y material apícola. También existe el mercado de postes, especialmente para las líneas aéreas de electricidad. Otro aspecto importante son los tableros compensados, que se producen como productos remanufacturados (SAGyP-INTA, 1995)

2.2. Género *Pinus* sp.

Es un género de plantas vasculares -generalmente árboles y raramente arbustos-, comúnmente llamadas pinos, pertenecientes al grupo de las coníferas y, dentro de este, a la familia de las Pinaceae, presentando una ramificación frecuentemente verticilada y más o menos regular. Existen alrededor de 110 especies de pino en el mundo. Los pinos son nativos del Hemisferio Norte, con solo una especie encontrada al sur del ecuador en la isla de Sumatra. En Norteamérica se ubican desde los 66°N en Canadá (pino Jack) hasta los 12°N por el sur en Nicaragua (pino caribeño). Las montañas subtropicales de México albergan la mayor diversidad de especies de este género, mientras que en el oeste de Estados Unidos (California) es el segundo lugar del planeta con más diversidad de pinos. En Eurasia se encuentran desde las Islas Canarias y Escocia por el Oeste hasta el lejano oriente ruso, y por el sur desde las Filipinas hasta los 70° N en Noruega y Siberia oriental (pino escocés y pino enano siberiano respectivamente). Siete especies son nativas y originarias de la península Ibérica y zonas aledañas y han sobrevivido y desarrollado desde tiempos remotos. En el norte de África existen pinos en las zonas montañosas, así como en los Himalayas y en el sureste asiático. Se han introducido pinos en áreas templadas y subtropicales del Hemisferio Sur, incluyendo Argentina, Brasil, Chile, Ecuador, Uruguay, Paraguay, Nueva Zelanda y Australia, donde crecen extensamente como recurso maderero, e inclusive algunas especies se han convertido en invasoras.

2.2.1 *Pinus elliottii* Engelm.

Es un pino nativo del sudeste de Estados Unidos, desde el sur de Carolina del Sur hasta el oeste y sudeste de Luisiana y el sur de los cayos de Florida. Es de rápido crecimiento, adaptado a climas y suelos húmedos, donde las precipitaciones se concentran en el verano con un promedio de 1270 mm anuales. Sus raíces requieren de tierra aireada, por lo que evita los pantanos propiamente dichos. En los Cayos de Florida, la variedad densa se realiza en suelos con piedra caliza kárstica, un tipo de roca extremadamente pobre en nutrientes derivada de los antiguos arrecifes de coral. *Pinus elliottii* puede formar rodales puros o bosques de pinos mezclados con *P. taeda* y *P. serotina*. Las poblaciones más al sur (*P. elliotti* var. *densa*) se desarrollan en una estepa de pasto, adaptados a los frecuentes incendios. Inicialmente, las plántulas producen muy poco crecimiento apical y desarrollan un extenso sistema de raíces, que luego del impacto del fuego, se forman nuevos brotes en el vértice de un tallo muy corto cerca del suelo.

Morfológicamente es un árbol que alcanza alturas entre 18 a 30 m con un diámetro de tronco de 60-80 cm. Las hojas son aguzadas muy finas como agujas, dispuesto en grupos de dos o tres, y de 18-24 cm de longitud. Los conos son redondeados rojo-pardo, de 5-15 cm en longitud con un corto (2-3 mm) pedúnculo. Se los distingue de su pariente *P. taeda* por su mayor longitud, espínulas más redondeadas y conos más grandes rojo pardos. Requiere inviernos frescos con temperaturas cercanas a 0°C. No soporta períodos secos con déficit hídrico. Se adapta a suelos superficiales, hidromórficos pero tiene mejores rendimientos en suelos profundos y sueltos. Soporta muy bien las heladas y los calores fuertes.

Existen dos variedades:

- *P. elliottii* var. *elliotti* (típico pino elioti). Carolina del Sur a Louisiana, sur de Florida central. Hojas en fascículos de dos a tres, mayormente tres. Conos más grandes, 7-15 cm.
- *P. elliotti* var. *densa* (pino elioti del sur de Florida). Sur de Florida, incluyendo las tierras pantanosas. Hojas de a dos. Conos más pequeños, 5-12 cm.

La madera es utilizada para muros macizos en exteriores e interiores, puertas placas, tiranterías y estructura de techos, entablonados para techos, encofrados, celulosa, multilaminados, entre otros usos.

2.2.1 *Pinus taeda* L.

Es originario del sudeste de Estados Unidos, desde el este de Texas y centro de Florida hasta el sur de Nueva Jersey, entre los 28 y 39° de latitud norte (Hampel, 2005). El clima en esa región es cálido-húmedo con temperaturas medias de 13 a 24°C, temperatura mínima absoluta de -23 °C y precipitaciones de 1020 a 1520 mm. Comúnmente es llamado pino amarillo o pino grande, por su talla, especialmente en ejemplares aislados como el pino de Rosemary por su distintiva fragancia.

Se desarrolla en suelos de características variables, sin embargo, se adapta mejor a los rojos profundos y de buen drenaje. Su requerimiento de fertilidad es mínimo y en relación a la acidez es recomendable la gama de suelos con pH de entre 4.5 y 5.5. Fue introducido en Argentina a finales de la década de 1940. Se cultiva en la región litoral, desde la provincia de Buenos Aires hasta Misiones. Se han realizado plantaciones también en los valles de las sierras de Córdoba y en Tucumán. Los ensayos de procedencias realizados hasta el momento, indican que los mejores crecimientos se obtienen con los materiales procedentes de los condados Marion, Livingston y Columbia del estado de Florida en Estados Unidos (Fassola, 2004). El crecimiento estará determinado por el material de plantación utilizado, las condiciones del medio y el manejo silvícola aplicado. Se han registrado en nuestro país incrementos medios anuales de entre 20 y 40 m³.ha⁻¹.año⁻¹, lo cual supera ampliamente al crecimiento en su lugar de origen de 10 m³.ha⁻¹.año⁻¹ aproximadamente. El turno de corta para la especie, cuando el objetivo es la obtención de madera para aserrado, es de 18 a 20 años.

Una característica de los Pinos es su adaptación a suelos jóvenes, pobres en materia orgánica y nutrientes. En condiciones de muy baja fertilidad, *P. elliottii* tiene ventajas en su crecimiento, debido a una mayor eficiencia nutritiva y una mejor partición tallo-hoja de materia seca. Al mejorar las condiciones de fertilidad, con agregado de fertilizantes y/o control de malezas, *P. taeda* muestra una mayor plasticidad de crecimiento, superando rápidamente a *P. elliottii*. *P. taeda* resiste mejor la sequía que el *P. elliottii* y se adapta mejor a suelos húmedos e inundados temporariamente.

Son árboles de gran porte que pueden llegar a una altura de 30 a 35 m, registrándose ejemplares excepcionales de 45 m de altura. Poseen una copa densa y piramidal con ramas inclinadas hacia abajo. La raíz principal tiene un desarrollo moderado, con un extenso sistema de raíces laterales. La corteza es de color castaño rojiza a canela, gruesa y con profundas hendiduras. Acículas agrupadas en número de dos o tres por braquiblasto, de 12 a 22 cm de longitud, de color verde claro. Conos sésiles dispuestos de a 2 o 4, de color verde

que tornan a pardo al madurar, de 7 a 13 cm de largo. Cada escama se encuentra provista de una espina roma de 3 a 6 mm. Las semillas son aladas de forma romboidal de 4 a 5 mm de largo, y se cuentan en número de 27 a 58 mil por kg.

El duramen es susceptible al ataque de insectos y poco resistente al ataque de hongos, mientras que la albura, es susceptible al ataque de hongos cromógenos. Se clasifica como madera poco durable dado que a la intemperie y en contacto con el suelo, su vida útil se estima en 5 años. La madera es muy apta para pastas celulósicas y paneles aglomerados, usos para los que se destina generalmente el producto de los raleos. Los rollizos de mayor diámetro, una vez aserrados, se emplean en carpintería de obra, remanufacturas como machimbres, molduras y tableros de listones, muebles, revestimiento interior, tarimas livianas, maderas terciadas, envases, cajonería, pisos de poco tránsito. Se utilizan también postes de pino impregnado. Su resinación no es económicamente conveniente por la escasa producción.

2.3. Especies de la familia Salicáceas

Los árboles pertenecientes a esta familia tienen ciertas particularidades que, si bien los aproximan a un buen número de plantas cultivadas, les dan un carácter original en relación con los otros árboles productores de madera. Los mismos se propagan esencialmente por vía vegetativa, en vez de por semillas. Por otro lado, son diocas, y su hibridación es frecuente entre árboles de tipos diferentes y de sexos complementarios. La forma de multiplicarse permite que a partir de un individuo que presente características y rendimiento interesantes para el cultivo, se obtengan un número infinito de árboles exactamente con los mismos caracteres y cuyo conjunto constituyen un clon (Borodowski y Suárez, 2004; 2006). Este género se caracteriza por su rápido crecimiento, adaptabilidad, facilidad de clonación, resistencia a enfermedades y diversos usos de la madera (debobinado, aserrado, celulosa y aglomerado).

El área de dispersión natural del género encuentra en el hemisferio norte. Comprende cinco grupos *Populus* o secciones: *Leuce*, que se encuentra por todo el Hemisferio Norte; *Tacamahaca* en Asia y América del Norte; *Aigeiros* en la zona templada del Hemisferio Norte; *eucoides*, que crece en la parte sureste de América del Norte y en el Extremo Oriente y *Turanga*, de la cuenca mediterránea. Más de un 90 % de los álamos cultivados en el mundo corresponden a la sección *Aigeiros*, que incluye a *Populus nigra* y *Populus deltoides*. Este género está presente de forma esporádica en todos los bosques de las regiones templadas del hemisferio norte, en algunas zonas puede formar espontáneamente bosques o pequeños macizos cuya producción no ha competido con otras especies forestales. En Argentina y en la gran mayoría de las plantaciones a nivel mundial se cultivan el *Populus nigra* L., el *Populus deltoides* Marsh. y sus híbridos (*P. nigra* x *P. deltoides* (*P. x canadensis* anteriormente *P. euroamericana*)) llamados 'euroamericanos'. En el Delta Mesopotámico, se produce la introducción del género con el 'álamo carolino' (*Populus deltoides* subsp. *angulata* cv *Carolinensis*) a fines del siglo XIX donde su madera era utilizada con fines energéticos y en carpintería. Por otra parte, el género *Salix* reúne aproximadamente 300 especies originarias del hemisferio norte, preferentemente de regiones frías y templadas. Una sola especie *Salix humboldtiana* Willd. conocido como 'sauce criollo' es nativa de América del Sur. Esta especie, al ser superada en crecimiento, forma y características tecnológicas por

otros sauces, no posee un importante interés como cultivo forestal. En Argentina y a nivel mundial, varios clones de distintas especies del género *Salix* se encuentran en cultivo, entre ellas: *S. babylonica*, *S. nigra*, *S. alba*, *S. matsudana*, entre otras. Sin embargo, para la región del Delta, los clones de sauce más utilizados son: *Salix babylonica* var. *sacramento* Hortus -conocido como sauce americano-, *Salix nigra* clon 4 'nigra 4', *Salix babylonica* x *Salix alba* 'A 131/25' y *Salix babylonica* x *Salix alba* 'A 131/27' (Borodowski y Suárez, 2004; 2005; 2006).

Las especies del género se clasifican como especies heliófilas, desarrollándose a campo abierto como dominantes en la sucesión. Normalmente, al igual que los sauces, son las primeras especies leñosas que colonizan naturalmente en los aterramientos provocados por las crecidas en los valles de los grandes ríos. Presentan una actividad fotosintética elevada. El fotoperíodo influye de manera significativa en la brotación de las yemas, la floración, la fructificación, el cierre de yemas y la caída de las hojas. En este sentido, se ha observado para *P. deltoides* un gran número de ecotipos fotoperiódicos entre el sur y el norte del área natural de dispersión de la especie. Por otro lado, la intensidad en la respiración radical de los álamos es elevada comparada con otras especies, o cual una buena aireación de los suelos debe ser considerada como elemento primordial del éxito de la plantación. Suelos compactos, mal estructurados y cuya macroporosidad es inferior al 10% no resultan buenos para los álamos. Las raíces de los álamos pueden respirar a expensas del oxígeno disuelto en las aguas de infiltración en que circulan en la capa freática móvil. En cambio, los sauces resisten mejor la asfixia radicular. En general, las salicáceas son especies higrófilas. Las necesidades de los álamos se satisfacen de forma óptima cuando el contenido en agua del suelo está cerca de la capacidad de retención durante el período activo de vegetación, lo que se realiza cuando los álamos disponen de una capa freática permanente accesible a sus raíces, o al menos cuando estas últimas pueden desarrollarse en la franja de ascensión capilar que está por encima de la capa freática.

2.3.1 *Populus deltoides* W.Bartram ex Marshall.

El álamo negro de Norteamérica (*Populus deltoides*) es un árbol nativo de Norteamérica, se encuentra creciendo en el este, centro y sur de Estados Unidos, también en la parte sur de Canadá y el norte de México. Los álamos son especies pioneras, exigentes en luz y agua para su adecuado desarrollo. Las condiciones óptimas de suelo incluyen profundidad de 2 metros, textura franco a franco arenosa con buena aireación, bien estructurados y no compactos. Su capacidad para la propagación vegetativa permite su multiplicación como clones, favoreciendo además la homogeneidad de la plantación y el manejo. En la región del Delta los clones más difundidos son *Populus deltoides* 'Australiano 106/60', *Populus deltoides* 'Australiano 129/60', *Populus deltoides* 'Carabelas INTA', *Populus deltoides* 'Stoneville 67' y *Populus canadensis* 'Ragonese 22 INTA'.

Morfológicamente son árboles decíduos o semiperennes, de copa variable según la especie, pudiendo ser globosa, oblonga o piramidal. La corteza posee grietas y figuras que varían según la especie y variedad. Las hojas son simples, alternas, pecioladas y con estípulas. La forma es oval a triangular con lóbulos de distinta profundidad. Es frecuente el dimorfismo y el heteromorfismo. Especies diclino dioicas, es decir sexo en flores separadas y en distinto pie. Las flores son aperiantadas y están dispuestas en amentos colgantes. Los frutos son cápsulas dehiscentes que encierran numerosas semillas pequeñas cubiertas

por pelos algodonosos y que son diseminadas por el viento. En general florecen antes de la foliación en primavera a partir de yemas especializadas.

P. deltooides 'Australiano 106/60', es un clon de rápido crecimiento, con fuste cilíndrico y ramas finas dispuestas en verticilos. Presenta muy buena plasticidad, por lo cual se adapta a diversas situaciones de cultivo sin modificar de manera significativa su rendimiento. Madera blanca que resulta apta para la industria del aserrado y debobinado, como también para industrias de triturado. *P. deltooides* 'Australiano 129/60' y 'Stonville 67', presenta muy buenos rendimientos volumétricos, y resistencia a roya y cancrrosis. Su madera blanca resulta muy apta para la industria del aserrado y debobinado. También puede utilizarse en las industrias de triturado. Sin embargo, *P. deltooides* 'Carabelas INTA' es altamente tolerante a la roya del álamo y cancrrosis. Presenta altos porcentajes de prendimiento lo que garantiza una buena instalación del cultivo. Madera blanca apta para la industria del aserrado, debobinado y triturado. La superficie de plantación de este clon en albardón con sistema de zanja abierta destinada es menor ya que no hay suficiente información en cuanto a su rendimiento y tolerancia al anegamiento, como es el caso del *P. deltooides* 'Alton', del cual hay antecedentes y hace años se realizan plantaciones observando un buen comportamiento en la región. Pero a su vez, la elección de plantar dos clones en este rodal fue para disminuir el riesgo por pérdidas. *P. deltooides* 'Alton' es altamente adaptable para plantaciones en zanja abierta por su tolerancia a inundaciones y su rápida recuperación luego de un periodo de estrés hídrico.

2.3.1 *Salix babylonica* L.

El sauce llorón -también llamado 'sauce americano'-, es un árbol que pertenece a la familia de las salicáceas y es nativo del este de Asia, particularmente del norte de China. Se trata de una especie pionera y de rápido crecimiento, que es tolerante a condiciones de anegamiento. Crece bien en suelos húmedos a excesivamente húmedos, pero tiene baja tolerancia a sodicidad y salinidad en el suelo. Si bien su crecimiento es rápido, no vive más de 60 años. Crece de manera silvestre y sin cuidados especiales en la región costera del estado de Chiapas (México), donde es utilizado para para postes, leña y sombra, y tiene un importante valor desde el punto de vista ecológico ya que evita la erosión del suelo en riberas de ríos fortaleciendo los cauces ante posibles inundaciones. En líneas generales es un árbol rústico, ramificado, de copa frondosa y crecimiento inicial lento en especial durante los primeros cinco años. Realiza un rápido control de malezas en el sotobosque, por lo que se lo usa como cortina cortafuegos. Su madera blanca posee excelente calidad para fabricar pulpa de papel (por sus altos valores de densidad y relación largo/diámetro de fibra) teniendo como desventaja sus bajos incrementos volumétricos.

Es un árbol caducifolio de 8 a 12 m de altura (excepcionalmente 26 m), con ramas delgadas, flexibles, largas, colgantes casi hasta el suelo. Su tronco tiene la corteza fisurada. Las hojas son lineales a lanceoladas, de 8 a 15 cm de largo, acuminadas, de borde finamente aserrado, glabras y glaucas en el envés cuando son adultas. El pecíolo es corto y pubescente. Las inflorescencias brotan junto con las hojas, tiene amentos cilíndricos de 2 a 5 cm de largo, con flores de color amarillo pálido. Se reproduce por anemocoria, y se multiplica perfectamente por injertos y esquejes porque tienen alta capacidad de enraizamiento. Se suele plantar de manera aislada para que resalte su bello porte. Al igual que los álamos

sufren mucho el ataque de insectos minadores con graves secuelas como por ejemplo *Corythucha salicata* Gibson (Hemiptera, Tingidae).

La mayor producción de sauce se destina a triturado. Solo menos del 10% de los sauces producidos en esta cuenca forestal se destinan hoy a usos sólidos, pese a que su madera es conocida de buen potencial tecnológico para aserrado, debobinado, fabricación de muebles, pisos (Atencia, 2010) e inclusive, parte de construcciones (Sánchez Acosta 2015). El sauce "nigra 4" es un clon con un excelente vigor y desarrollo en especial en sitios bajos y húmedos y es muy resistente a períodos de anegamiento prolongados. Lamentablemente, su madera es de una coloración rojiza, lo que produce que no sea aceptado por la industria celulósica aunque sí por la de tableros. Los sauces "131-25" y "131-27", exceptuando el "sauce americano" son los clones más plantados. Poseen buen vigor y plasticidad, con fuste derecho, cilíndrico y poco ramificado, además, son de madera blanca de buena calidad para la producción de papel y cajonería.

3. Manejo agronómico y forestal de las plantaciones

3.1. El suelo forestal: características de la región

El suelo es un componente físico del ecosistema que define en términos silviculturales, lo denominado "índice de sitio". El mismo expresa a través de la altura de los árboles dominantes y codominantes de un rodal, y se mide como Incrementos Medios Anuales (IMA) de las diferentes especies en producción en las diferentes regiones. Si bien se presentan diferencias marcadas en las propiedades de los suelos que acotan el área de expansión de las plantaciones forestales, los factores climáticos presentan una mayor incidencia sobre la adaptación y crecimiento de las especies. La respuesta productiva del árbol se encuentra mayormente vinculado con la radiación solar incidente, los regímenes de lluvias, temperatura, y heladas; así como con aspectos geológicos e hidrográficos. En síntesis, deriva de un conjunto de variables físicas y biológicas del ecosistema

En la actualidad la provincia de Misiones posee aproximadamente 400 000 ha de plantaciones forestales y se estima que la superficie apta en el marco de un ordenamiento territorial equilibrado con otros usos del suelo son 800 000 hectáreas aproximadamente. Por otro lado, la provincia de Corrientes cuenta con aproximadamente 4 millones de hectáreas aptas para forestación, teniendo en cuenta la aptitud de los suelos.

En términos prácticos, una clasificación general de los sitios respecto a su aptitud se realiza en función de la capacidad de drenaje de los suelos, y en tal sentido se encuentran:

- **Lomas:** suelos con gran capacidad de drenaje debido a un escurrimiento superficial veloz que puede ser susceptible de erosión hídrica. La preparación del terreno, en estos casos, se suele hacer con subsolador de distintas profundidades de labor que depende en parte de la especie y el tipo de suelo. Si los suelos de lomas son aptos, se los usa preferentemente para el eucalipto ya que en las lomas los efectos de las heladas suelen ser menores y al no tener tanta humedad como los sectores más bajos, hay una probabilidad menor del ataque de hongos que suelen afectar este género.

- **Tendidos:** son suelos de tendidos, con pendientes muy suaves que presentan algún problema de drenaje por lo que se hace necesario drenarlos hacia lugares de escorrentía natural. Son suelos que luego de preparados, presentan una mayor capacidad de retener humedad. Por esta razón, géneros resistentes a las heladas, como pinos, presentan los mejores desempeños.

Las plantaciones de eucaliptos, en particular *E. grandis*, se distribuyen en una gama muy variable de suelos, como las lomas de suelos rojos arcillosos lateríticos del norte de Corrientes (Alfisoles y Ultisoles), los cordones arenosos del centro y sudoeste de Corrientes (Ordenes Alfisoles y Entisoles) y suelos arenosos, franco arenosos y arcillosos de la costa del río Uruguay en las provincias de Entre Ríos y Corrientes (Alfisoles, Molisoles, Entisoles y Vertisoles). En general, la productividad disminuye desde suelos altos y profundos hacia suelos bajos y superficiales (Aparicio et al., 2005). La ubicación en el perfil en suelos del noreste de Corrientes tiene una enorme influencia sobre el incremento volumétrico. En suelos rojos, los mayores incrementos medios anuales en volumen ($IMA = 50 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) se observan en las lomas donde la profundidad efectiva de suelo es mayor, y disminuye considerablemente en la media loma y se reducen a la mitad en el pie de loma a valores de $22 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$.

En términos prácticos, el eucalipto se desarrolla también en suelos arenosos con buen drenaje. El Este de la provincia de Entre Ríos presenta la mayor área de plantación, sin embargo, presentan bajos contenidos de materia orgánica y en consecuencia, baja fertilidad. En este sentido, se observan marcadas diferencias en la productividad en respuesta a las variaciones entre sitios. Los mejores suelos para *Eucalyptus grandis* en la región NE de Entre Ríos, son los suelos arenosos pardos profundos, localmente llamados mestizos del orden Inceptisol y Molisol con IMA que pueden llegar a $50 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, similares a los del NE de Corrientes y S de Misiones. En cambio, sobre arenas rojizas profundas (orden Entisol) y suelos arcillosos (orden Vertisol), el IMA se reduce a 33 y $36 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$, respectivamente. Estos últimos, presentan mayor fertilidad y mayor retención de humedad que los arenosos profundos, pero eventualmente ciertas limitaciones radiculares. A modo comparativo, los mejores crecimientos del *E. grandis* en Australia se registran en suelos francos profundos y húmedos, bien drenados de origen volcánico o aluvial. También crecen moderadamente bien en suelos arcillosos si éstos tienen buen drenaje. Las altas tasas de crecimiento y demanda de nutrientes de las plantaciones de eucaliptos, y los sucesivos ciclos de plantación-cosecha, representan un alto riesgo para la conservación de los nutrientes del suelo (Judd, 1996; Turner y Lambert, 1996; Gonçalves et al., 2004). Numerosos estudios en la provincia de Entre Ríos han demostrado que luego de un turno de plantación se registran disminuciones de los contenidos de materia orgánica y macronutrientes en el suelo (Goya, 2004; Sandoval et al., 2018; Tesón, 2011).

Respecto al pino, una fracción importante de los núcleos en la provincia de Corrientes, se ubica en las planicies arenosas del sudoeste y centro, que abarcan una superficie cercana al millón de hectáreas. Los suelos más representativos tienen como mayores limitantes baja fertilidad y una napa de agua superficial fluctuante (Escobar et al., 1996). Con excesos de lluvias la permanencia de la napa cercana a la superficie limita el desarrollo de las raíces, con una disminución de la productividad, debido a una merma del crecimiento y un aumento de árboles volcados o deformados en la base por falta de anclaje (Aparicio et al., 2006).

Es por ello, que se han desarrollado experiencias con distintas técnicas de establecimiento y de preparación del terreno. El objetivo principal es crear un ambiente edáfico adecuado para el establecimiento del plantín mediante la reducción o eliminación de las condiciones del suelo que limitan el crecimiento y la sobrevivencia del cultivo. Por lo tanto, para que estas tierras sean aptas para la producción es necesario la sistematización del terreno con técnicas que modifiquen el nivel original del suelo. La construcción de camellones o *mounding* es una práctica habitual en la preparación del terreno de la región el SE de EE.UU., donde poseen problemas de drenaje. Estos consisten en cordones paralelos en el sentido de la pendiente, que favorecen la eliminación del agua y generan un ambiente aireado debido a su elevación y orientación.

Varios estudios enfatizan sobre el efecto positivo de los camellones sobre las propiedades físicas, químicas del suelo y sobre el crecimiento y sobrevivencia del cultivo forestal y en éstos se indica que el aumento en la productividad es el resultado de una mejora en las condiciones de aireación y aumento en la disponibilidad de nutrientes provocado por la mineralización de la materia orgánica. Sin embargo, algunos autores advierten que el efecto de los camellones pareciera perderse con el tiempo, con el desarrollo de la plantación. Los resultados obtenidos hasta los 4 años indican que en ambientes con drenaje restringido el *P. taeda* manifiesta mayor tolerancia que el *P. elliotii*. El crecimiento y la sobrevivencia alcanzados por ambas especies indican que los terrenos localizados en posiciones topográficas de bajos hidromórficos, no resultan aptas para su cultivo en su condición de relieve natural. Sin embargo, se logra un contraste en el crecimiento con camellones, donde ambas especies pueden establecerse y crecer, dado que cuentan con unos 40 centímetros de suelo con buenas condiciones de aireación, aun en períodos de precipitaciones abundantes. La aplicación de estas tecnologías en la preparación del suelo permitió la expansión de la actividad foresto-industrial en la región NE de Corrientes (Lupi et al., 2005).

Por otro lado, es importante mencionar que *Pinus taeda* está ampliamente distribuida en suelos del orden Kandiidult, conocidos localmente como 'suelos rojos' que se extienden del noreste de Corrientes hasta Misiones. En la provincia de Misiones, los suelos rojos ocupan el 33% (Ligier et al., 1990) donde se encuentra la mayor superficie forestada con *P. taeda*. Estudios realizados en la región indican que el crecimiento de las plantaciones de *P. taeda* tienen mayores limitaciones (menor índice de suelo) en suelos pedregosos respecto de los suelos rojos, independientemente del agrupamiento edafoclimático. Los suelos pedregosos resultan estar mejor provistos en nutrientes por unidad de superficie, lo cual se debería a la diferencia en el tiempo de desarrollo y meteorización (mayor en los suelos rojos profundos). Sin embargo, los suelos pedregosos poseen una menor profundidad efectiva y menor volumen de la fracción fina, lo que podría manifestarse más intensamente en los intervalos sin lluvias generando escasez de agua en comparación con los suelos rojos, afectando negativamente el crecimiento. Adicionalmente, la mayor oferta de nutrientes en los sitios con suelo pedregoso no se observó aumento en la concentración de N y P foliares, comparado con los sitios de suelos rojo profundo, lo cual muestra que los nutrientes no resultan una limitante al crecimiento en las condiciones actuales de los suelos cultivados con la especie en cuestión (Martiarena et al., 2014).

En relación a las salicáceas, las especies del género *Salix* son tolerantes a condiciones de anegamiento. Las mismas se desarrollan bien en suelos húmedos a excesivamente

húmedos, pero presentan baja tolerancia a sodicidad y salinidad en el suelo. Sin embargo, el género *Populus* son menos tolerante al anegamiento, obteniendo buen crecimiento en suelos húmedos, profundos y fértiles. La excepción es *P. alba* que presenta baja tolerancia a suelos sódicos, salinos, y de textura arcillosa. Estos umbrales tolerables por la salicáceas se encuentran en el bajo delta del río Paraná caracterizados por suelos aluvionales, con distinto grado de evolución y capa freática cercana (entisoles y molisoles ácuicos) denominados comúnmente:

- ‘semipantanosos’ en los esteros abarcando el 80% de la superficie del delta inferior. Cuentan con un horizonte superficial ácido (pH 4.5) de alto contenido de materia orgánica poco descompuesta, y un horizonte subsuperficial mineral de color gley.
- ‘húmicos de gley’ ubicado en los albardones ubicado en el 20% restante de la superficie. Estos cuentan con un horizonte superficial franco arenoso o franco arcilloso, de alto contenido de materia orgánica y pH ligeramente ácido entre 5.5 y 6.5; y un horizonte subsuperficial gley.

La región del ‘bajo delta’ presenta islas que generalmente tienen un perímetro (‘albardón’) más elevado, entre 0.6 y 1 m de altura, y son deprimidas hacia el interior conocidos como zonas de estero, pajonal o bañado. Estos ecosistemas sufren inundaciones periódicas debido a los períodos de crecidas de los ríos Paraná y Uruguay, como también de los vientos del sector SE provenientes del río de La Plata. En resumen, la calidad del sitio es determinante en las salicáceas, fundamentalmente con: a) la profundidad efectiva de enraizamiento (por la cercanía de la capa freática), b) la clase textural, c) las altas concentraciones de materia orgánica, y en muchos casos pH ácidos, d) los sitios enriquecidos con alta salinidad proveniente de sedimentos marinos, y e) con el manejo del agua mediante endicamientos, redes de drenaje, compuertas y bombas. En general, los valores de conductividad eléctrica no determinan limitaciones importantes por salinidad o sodicidad; sin embargo, se han encontrado sitios con mediciones de CE elevada en el estrato arcilloso. Estudios realizados en diferentes sitios forestales en el Bajo Delta, han demostrado bajo contenido de fósforo disponible (Pd) y aceptable contenido de fósforo total (Pt); asociado a los bajos pH y la alta concentración de hierro de estos suelos que predispone a la precipitación de las formas disponibles del fósforo (Bonfils, 1962), situación que se intensifican al extraer el agua del sistema para forestar, por lo que la disponibilidad de agua en el periodo de crecimiento es clave (Cerrillo et al., 2015).

3.2. Densidad de plantación y producción

A modo general, cuando el terreno es relativamente uniforme parece razonable utilizar un marco que permita una distribución lo más homogénea posible sobre la superficie, con objeto de lograr un desarrollo armonioso de las copas de los árboles y de minimizar los fenómenos competitivos entre hileras y entre arboles de la misma hilera. Uno de los factores más fácilmente manejables por parte del productor lo constituye la elección de la distancia de plantación. Esta tiene una gran significación económica, por su relación directa con los costos de plantación, posteriores cuidados y aprovechamiento final, la calidad de los productos a obtener y su destino industrial. La posibilidad de uso de la madera está determinada en gran medida por sus características tecnológicas, siendo en este sentido

la densidad básica de la misma una de las propiedades físicas de mayor relevancia para referir su grado de calidad, ya que influye sobre el rendimiento y calidad del producto final (Einspahr et al., 1969).

Por otra parte, Durante la planificación de la plantación se recomienda tener en cuenta la posición geográfica del área a plantar verificando que la misma se encuentre en zonas habilitadas para tal fin, distante de áreas de preservación permanente y/o reservas naturales, áreas naturales protegidas u otras áreas de uso restringido. También es importante verificar la existencia de comunidades que pudieran ser afectadas directa o indirectamente por la actividad forestal (Baez y Pezzutti, 2014)

Respecto al pino, la plantación se llevara a cabo entre los meses de Mayo y Agosto de forma mecanizada cuando se realiza a raíz desnuda. También puede extenderse hacia épocas de mayores temperaturas, utilizando plantines en tubetes, con el consecuente aumento de los costos. El *Pinus taeda* presenta mejor desarrollo en lomas y medias lomas, mientras que el *P. elliotii* en sectores topográficos mas bajos. La densidad de plantación en *Pinus taeda* (dominante en la provincia de Misiones y Noreste de Corrientes), según lo recomendado sería de 1250 plantas/ha con un distanciamiento de 2 m entre árbol y 4 m entre hileras. Esta densidad permitiría obtener mayor cantidad de individuos con mayor diámetro que se traduce en mayor rendimiento económico. Sin embargo, existen plantaciones de baja densidad (entre 800 a 850 individuos/ha iniciales) en marco de plantación de 3x4, mientras que las de alta densidad se realizan en marcos de 2x3, obteniendo una densidad inicial de 1666 individuos/ha. En la provincia de Misiones se pueden obtener una productividad anual por hectárea entre 16 a 40 m³ teniendo en cuenta la especie de pino y la posición topográfica (Tabla 1)

Tabla 1. Productividad anual por hectárea (m³·ha⁻¹·año⁻¹) de *Pinus elliotii* y *P. taeda* en la provincia de Misiones.

Especie	Lomas	Media Lomas	Bajos
<i>Pinus elliotii</i>	22 - 30	20 - 25	16 - 22
<i>Pinus taeda</i>	28 - 40	25 - 30	21 - 33

Los turnos de corta más comunes para plantaciones con destino aserrable para el caso de pinos resinosos son en general de 20 a 25 años. Para plantaciones de pino orientadas a la producción de rollizos para pulpa, los turnos de corta de utilizados son de 14 a 16 años. Los modelos deben ser flexibles, ya que tienen que analizar todas las alternativas posibles para determinar qué cortar y cuándo en función del capital disponible y la demanda efectiva de madera existente por parte de la industria.

Los eucaliptos presentan densidades de plantación entre 1000 a 1100 plantas/ha bajo arreglos espaciales cuadrados o rectangulares de 3x3 m o 4x2.5 m. Estos distanciamientos utilizados permiten obtener en rotaciones de 10-12 años con madera de diámetro considerable destinada para aserradero. En la provincia de Corrientes también se realizan plantaciones con densidades iniciales de 625 plantas/ha (4x4) y de 1600 plantas/ha en marcos de plantaciones 2.5x2.5 de separación entre plantas y filas. Estas son las forestaciones más antiguas de la región se plantaron que, si bien se obtienen un mayor volumen total, disminuye notablemente el diámetro traducido en un aumento de la edad de rotación cuando el objetivo de la plantación es el aserrado. En la provincia de Entre Ríos,

se recomiendan densidades que no superan las 1111 plantas/ha, con su posterior manejo de podas y raleos para maderas de calidad. Una porción importante de la productividad de *Eucaliptus grandis* se define en la etapa de establecimiento. El período abarca desde la plantación hasta el "cierre de las copas". En plantaciones con una densidad inicial de 800-1000 individuos.ha⁻¹ la etapa puede variar desde menos de 2 años hasta 4 ó 5 años. La amplitud en la variación depende de la calidad del sitio y en particular de las técnicas silvícolas que se apliquen. En esta etapa, las técnicas que tienen impacto en la productividad son la preparación del terreno, el control de malezas y la fertilización.

Por otro lado, es importante mencionar que en eucaliptos es posible plantar a una distribución de 6x2, logrando la misma densidad inicial, favoreciendo al rebrote posterior y disminuyendo sustancialmente el pisoteo de las cepas por el tránsito de la maquinaria de cosecha (Baez y Pezzutti, 2014)

La fecha de plantación de la región es durante la primavera, entre setiembre y noviembre con el aumento de las precipitaciones. Son especies sensibles a heladas, aspecto importante a tener en cuenta, hasta en la selección del terreno, preferentemente en lomas profundas. En sitios de buena aptitud y con una silvicultura apropiada es la especie de mayor tasa de crecimiento, puede alcanzar a 60 m³·ha⁻¹·año⁻¹ de madera, de lo contrario, si el sitio no es adecuado y no se acompaña de una silvicultura apropiada el crecimiento no supera los 15 m³·ha⁻¹·año⁻¹ (Aparicio et al. En la provincia de Misiones se obtienen crecimientos promedios de *Eucaliptus grandis* entre 30 a 40 m³·ha⁻¹·año⁻¹ en las medias lomas, mientras que aumenta un 20% en las lomas. Sin embargo, en la provincia de Entre Ríos, es una especie de rápido crecimiento, que según su estado y origen, produce incrementos anuales medios que oscilan entre 25 y 45 m³·ha⁻¹·año⁻¹. Estos valores permiten rotaciones de 10 a 15 años cuando el destino de la madera es el aserrado, pudiendo ser menores si el destino final es la pulpa celulósica (entre 6 a 7 años).

Respecto a las salicáceas, en la zona del Delta se utilizan de manera tradicional estacas de 0.5 - 0.7 m de largo y guías de un año de edad. Luego, en sistemas silvopastoriles, se incorporó la utilización de guías de dos años. La mejor época de plantación para plantas con raíz, barbados, es desde la segunda quincena de junio hasta fin de julio, para guías desde la segunda quincena de julio hasta principios de agosto y para estacas desde la primera quincena de julio hasta mediados de agosto (Borodowski, 2006). En el Delta, se utilizan densidades de plantación de entre 1100 y 400 plantas por hectárea. En caso de sistemas silvopastoriles, la plantación con guías de dos y tres años de edad, a 270 plantas por hectárea, puede acelerar el momento de ingreso del ganado en el campo (Casaubón et al., 2009). Las distancias de plantación dependen de las posibilidades económicas y el mercado que se pretenda abastecer. Las más utilizadas en el cultivo de sauces son 2x1.75 m, 2x2, 2x3, o 3x1.75; mientras que en álamos es más espaciado, 3x3, 4x4 o 5x5. Sin embargo, hay una tendencia fuerte de muchos productores hacia grandes distanciamientos entre hileras y muy pequeños entre plantas, como ser, 5x2 o hasta 7x2, con el objetivo de obtener madera de mayor diámetro y abastecer mercados de mayor valor.

El turno de corta final en el Delta es entre los 12 y 16 años para el álamo y 10 a 14 años para el sauce dependiendo de los objetivos de producción y el mercado. Sin embargo, el 95% del sauce se destina únicamente con destino celulósico papelerero, en consecuencia, hay déficit de buenos diámetros mayores a 8 pulgadas. Por otra parte, los rendimientos

esperados al turno de corta son para el álamo de 200 a 400 m³·ha⁻¹ y para el sauce de 120 a 250 m³·ha⁻¹, que en términos anuales se espera entre 20 a 25 m³·ha⁻¹·año⁻¹ y entre 15 a 20 m³·ha⁻¹·año⁻¹, respectivamente (Borodowski, 2006). En el caso de sauces para la industria del triturado, se plantan 1428 plantas/ha (3.5×2) para ataja-repunte, permitiendo este sistema el ingreso de maquinarias en el momento de cosecha y transporte de madera, para lo cual se debe dejar un espaciamiento considerable que permita la circulación. Para el caso de sauce en pajonal con zanja abierta se planta a densidades mayores de aproximadamente 2.500 plantas/ha (2×2), esto es debido a dos motivos: por un lado, a condiciones del terreno que no permiten el ingreso de maquinaria lo cual el traslado se hace manualmente (es necesario trozas de menor diámetros de fácil manipulación y traslado), y por otro, la ocupación del sitio es más rápida requiriendo menor control de malezas.

En cambio, las plantaciones de álamo destinadas a la industria del aserrado se plantan con densidades de 625 plantas/ha (4×4) para lograr un mayor crecimiento en diámetro por individuo, y a su vez permitir el tránsito de máquinas.

3.3. Manejo silvicultural de la plantación: podas y raleos

3.3.1 Poda

Cuando se iniciaron las plantaciones comerciales a gran escala en nuestro país, en la década de 1940, Argentina era importadora neta de papel. Se utilizaban altas densidades de plantación y cuando se realizaban intervenciones de poda rara vez superaba los 2.5 metros de altura. A partir de ello, se planteó como objetivo, reducir o eliminar la importación de papel. En la actualidad la poda en las plantaciones forestales se ha incorporado de manera generalizada y en combinación con raleos realizados de manera oportuna.

Las ramas de los árboles forman un tejido con las fibras en distinto sentido que las del tronco, lo que da origen a los nudos. Cuando la rama se corta verde, genera “nudos vivos” (del mismo color que la madera), mientras que las ramas secas originan “nudos muertos”, más oscuros, y que pueden llegar a desprenderse originando perforaciones. En particular, los eucaliptos poseen un desrame natural, por el cual a medida que el árbol crece en altura las ramas inferiores se van secando y, mediante un sistema de aislamiento natural del nudo con quino (gomo-resina) y una fractura, la rama se desprende sola. Este mecanismo no siempre es perfecto, dado que pueden quedar muñones quedando algunas ramas prendidas y otras, como en las plantas de bordura, se conservan verdes. Por este motivo se recurre a la poda, o escamondo, para asegurarse el desrame total. Entonces, el objetivo de la poda es maximizar la producción de madera de calidad, sin nudos, mejorando además la forma del fuste disminuyendo su conicidad. Este tipo de madera es demandada por laminadoras y aserraderos que elaboran productos de alto valor agregado.

Con esta práctica no sólo se amplían las posibilidades de obtener mejores precios en el mercado, también se facilita el desplazamiento de operarios y maquinarias en el terreno contribuyendo a la prevención de los incendios forestales, cortando la continuidad vertical del combustible.

Otros tipos de podas que se pueden mencionar son aquellas asociadas a motivos fitosanitarios, donde se eliminan ramas afectadas por plagas o enfermedades, podas para la obtención de productos forestales no madereros, podas de formación cuando la

arquitectura de algunas especies así lo requiere y en ocasiones se realizan estas intervenciones para reducir la resistencia al viento, la prevención de incendios o en los sistemas silvopastoriles para aumentar la producción de forrajes.

La primera poda o "poda baja" se realiza en el total de árboles que compone la plantación, se descartan los árboles dominados y los defectuosos. La primera poda se debe hacer antes de que se sequen las ramas basales. Las ramas secas producen "nudos muertos" que se desprenden fácilmente de las tablas. La segunda poda se combina con el primer raleo, para ello se seleccionan los 500-650 árboles/ha de mayor crecimiento y tronco recto. La tercera poda se debe combinar con el segundo raleo, en esta intervención se podan los 250-350 árboles/ha sobresalientes en cuanto crecimiento y rectitud de tronco que quedarán hasta el final de la rotación. Las principales recomendaciones se basan en considerar inicialmente el diámetro y la altura de los árboles dominantes (rectos y sin bifurcaciones). En este sentido deben descartarse los árboles oprimidos, deformados y torcidos. Por otro lado, la altura de poda no debe sobrepasar el 50% de la altura total del árbol en eucaliptos, y 50-60% en pinos.

En plantaciones de pino, casi siempre las podas son selectivas. La primera generalmente se realiza al 4º o 5º año hasta una altura de 2.0 m, mientras que la segunda y la tercera poda, entre los años 5º-6º y 7º-8º año, respectivamente, buscando obtener una altura de 3.5 m y 5.0 m. La cuarta y última poda se lleva a cabo a los 9 (o eventualmente 10 años de edad), con la que se logra en promedio los 6.5 m. Para el caso de eucalipto, la primera se realiza entre el primer y segundo año hasta los 2.0 m de altura (Cuadro #1). Cuando son manejadas para obtener materia prima para aserrado y/o debobinado, se ejecuta un esquema diferenciado con tres intervenciones.

Para el caso de las salicáceas se están experimentando variantes en cuanto al momento e intensidad de las mismas, mientras que en general se realizan sobre una base empírica. Cuando el destino de la producción es el aserrado o el debobinado de los álamos, se realiza una poda de formación al primer año y luego de realce al 3er año acompañando el crecimiento en altura de la plantación. En estos casos, el objetivo consiste en lograr de 6 a 7 m de fuste podados libres de nudos. Esto será aplicado a 450 árboles/ha, dejando el tercio superior de la copa inicial. La segunda poda se realiza a los 7 años sobre los 330 árboles/ha de la cosecha final. La altura de poda está dada por las trozas a sacar libre de nudos, la cual será de 6 m de altura para obtener tres trozas de 2 m por árbol (Tabla 2). En general se podan sólo los árboles que van a quedar después del raleo definitivo.

Tabla 2. Resumen general de podas por especies forestales de la Mesopotamia Argentina.

Especie	Edad(años)	Altura de poda (m)	Densidad de poda (# individuos/ha)
Pinos	3-5	1.8-2.0	750
	5-6	3.5-4.0	500
	7-8	5.5-6.0	500
	9-10	7.0-9.0	250
Eucaliptos	1-2	2-2.5	Todos
	2-3	5.5	500-600
	5-6	7.0-9.0	250-350
Álamos	1-2	2-4	450
	5-7	5-6	330

3.3.2. Raleos

El raleo es una intervención silvicultural que reduce el número de individuos por hectárea y cumple con el objetivo de liberar la competencia y permitir mejor el crecimiento de los individuos que quedan en la plantación. De esta manera se concentra el crecimiento de la misma en un número reducido de árboles, lográndose mayor diámetro individual al final de la rotación, o bien reduciéndose el turno de corte. El manejo integrado de las podas y los raleos obliga desde el inicio de la plantación un diseño de producción diferente. Las rotaciones son más largas, debiendo hacerse inversiones intermedias para las podas y raleos, pero también habrá ingresos intermedios por venta de raleos, pero siempre con el objetivo definido de producir madera de calidad. Los objetivos del raleo consisten en: obtener producto de mayor diámetro, lograr un retorno de capital anticipado, aprovechar el material que sino se ralea quedará seco o dominado, reducir el turno de rotación, uniformar el tamaño y la forma de la plantación, eliminar individuos indeseables por forma, sanidad o tamaño; y regular el crecimiento para mejorar la madera de calidad.

Esta práctica es indispensable cuando se pretende producir maderas de diámetros aserrables o laminables. Para el caso de los eucaliptos, por ejemplo, en la industria de chapas (faqueados) y con rollos de buena calidad pueden trabajarse diámetros de 30 cm, pero se prefiere que éstos tengan más de 40 cm. En debobinado se permite el procesado de diámetros de 25 cm siempre que hayan sido podadas, pero si la madera tiene nudos, se requiere diámetros de 30-35 cm en punta fina sin corteza. En general, como regla forestal, el primer raleo se hace cuando se entrecruzan las copas y dificultan el paso (inconveniente serio en caso de focos de incendios), los árboles pueden tener entre 6 a 8 metros de altura. En cambio, el segundo raleo se practica cuando tienen el doble de altura y vuelven a entrecruzarse las copas, mientras que el tercer raleo queda remanentes entre 200 o 300 de los mejores árboles para su tala rasa, permitiendo que aumenten su diámetro.

En el caso del pino, si el objetivo es producir madera de calidad, normalmente junto con la primera poda se realiza un primer raleo. Este va a ser un raleo a desecho o raleo pre-comercial. Se entiende por esto a la eliminación de los árboles defectuosos o de menor calidad y que no tienen valor comercial o de venta. La conveniencia de este raleo se basa en eliminar los árboles remanentes van a crecer más vigorosos y van a ser más resistentes al ataque de plagas como el *Sirex* spp. Por otra parte, el número de árboles a podar será menor y por el tamaño que tienen los árboles a esa edad, es más rápido y más barato ralearlos que podarlos. Si no se realiza este raleo, el primer raleo comercial será de alta densidad siendo más costoso. Por otra parte, se disminuye el riesgo de incendios al disminuir la continuidad del material combustible. La poda junto con el raleo, favorecen la producción de forraje (por entrada de luz y agua de las precipitaciones) y el tránsito del ganado. No es recomendable evitar un raleo de desecho plantando menos árboles, dado que la calidad y homogeneidad de los mismos, determina que sólo aproximadamente un 50% llegan a convertirse en árboles de buena calidad. Además, al momento de realizar la primera poda, ya se pueden identificar los árboles con mayor potencial.

En la provincia de Misiones, se obtuvo mayor producción en volumen total acumulado en *Pinus taeda* cuando se ralearon el 66% de los árboles respecto a un testigo. En los testigos (sin raleo) se observó mortandad por competencia entre árboles, de los 5 a los 15 años pasó de 1683 a 1080 árboles por hectárea, lo que representó una mortandad de 603

árboles (35.8%). La comparación de los resultados muestra que raleos fuertes promueven una ganancia sustancial en el incremento y en la dimensión final del diámetro, pero, conforme muestran los resultados de la producción volumétrica causan reducción drástica de la producción total del rodal. La intensidad ideal de raleo va a depender principalmente de la finalidad de la madera a ser producida. Si la intención es producir el máximo de volumen sin exigencias de calidad y dimensiones de la madera, deben ser hechos raleos menos exigentes o directamente dejar de hacerlos, a partir del momento que se plante con un espaciado inicial adecuado o que se establezcan rotaciones más cortas. Mientras que se busca la maximización de la producción en volumen, se desea obtener madera de mayores diámetros e inevitablemente es necesario promover raleos un poco más severos.

En la provincia de corrientes, algunas empresas que poseen plantaciones de eucalipto orientadas a productos de madera sólida realizan un raleo entre el quinto y séptimo año, mientras que las empresas más integradas verticalmente practican dos raleos no comerciales (a desecho), el primero entre los 15 y 20 meses, y el segundo al tercer año.

En el Tabla 3 se observa la edad en la cuál se realiza el raleo y la tala rasa en las especies de pinos y eucaliptos más importantes. Además, se detallan los valores de producción de los productos generados en cada etapa para la provincia de Corrientes (pinos) y Entre Ríos (eucaliptos).

Tabla 3. Producción madera triturable, aserrable y laminable según los momentos de raleo para especies de pino en la provincia de Corrientes y eucaliptos de Entre Ríos.

Especie Género	Manejo	Edad años	Producción (m ³ .ha ⁻¹)		
			Triturable	Aserrable	Laminable
<i>Pinus elliottii</i>	1° Raleo	10	55	30	85
	2° Raleo	16	40	100	140
	Tala Rasa	23	50	310	360
<i>Pinus taeda</i>	1° Raleo	9	65	40	105
	2° Raleo	14	55	120	175
	Tala Rasa	21	65	330	395
Pino híbrido	1° Raleo	10	50	120	170
	Tala Rasa	19	70	415	485
Eucaliptos	1° Raleo	2-3	-	-	-
	2° Raleo	5-6	20	20	-
	3° Raleo	8-9	15	45	165
	4° Raleo	10-12	10	70	-
	Tala Rasa	15-18	25	335	335

En caso de los álamos, se quiere llegar al turno con árboles gruesos lo cual se inician las plantaciones con densidades altas para que la competencia provoque el crecimiento recto. Posteriormente se eligen los mejores para que aumenten su crecimiento a partir de la

liberación de recursos. Ensayos sobre *Populus deltoides* plantados a 5x3 con una densidad inicial de 666 plantas/ha, se realizó un raleo al séptimo año con tres intensidades diferentes (15, 30 y 45%). Producto del raleo, se observó una mayor homogeneidad de las plantas en diámetro y el diámetro a la altura del pecho de las plantas remanentes se incrementó principalmente en el tratamiento de mayor intensidad de raleo respecto al testigo. Además, en todos los clones, la mayor intensidad de raleo es la que siempre presentó mayores incrementos corrientes anuales en diámetro (Borodowski y Suárez, 2006). En el caso de *Salix* sp. no se realizan podas ni raleos debido a que el destino de producción es madera para triturado y no se requiere madera de calidad sino un mayor volumen.

3.3.3. Manejo de malezas, fertilización, plagas y enfermedades.

Un apropiado control de malezas en las plantaciones forestales permite obtener mayores rendimientos generando aumentos del 80% al 110% en volumen en relación con tratamientos sin control durante los primeros 4 años. Los controles realizados en la banda de plantación por 2 años logran diferencias en altura de 0.5 m en suelo rojo arcilloso y de 1.6 m en suelo gris limo-arcilloso a los 8 años en plantaciones de *Pinus taeda*, generando rendimientos marginales del 10-15 % a la edad de corte final. El aumento del rendimiento se atribuye a la mayor disponibilidad de agua, nutrientes y luz en los lotes con control. Las malezas más importantes, que se presentan tanto en forestación como en reforestación (según tipo de suelo e historia del campo) son: *Senecio brasiliensis*, *Sida rhombifolia*, *Solanum* sp., *Ipomoea* sp., *Paspalum notatum*, *Setaria parviflora*. Las malezas también impactan negativamente en las actividades de protección contra incendios, aumentando los costos de las podas y raleos, manejo de plagas e inventarios. En general las especies mencionadas son consideradas malezas, sin embargo algunas son utilizadas para pastoreo en ganadería extensiva o bajo sistemas silvopastoriles. Habitualmente las malezas son controladas durante los dos primeros años en la banda de plantación (2 m), utilizándose frecuentemente glifosato como herbicida post-emergente, y metsulfuron e Isoxaflutole como productos pre-emergentes. La aplicación se realiza con pantallas protectoras (usando glifosato), o sobre las plantas con herbicidas pre-emergentes que no causan fitotoxicidad. Aplicar éstas técnicas de control requiere de una planificación espacial cuidadosa (áreas de valor ambiental, asentamientos poblacionales), a su vez de contar con herbicidas, equipos apropiados y de un monitoreo periódico de los lotes (Pezzutti et al., 2014).

En el caso de los pinos en la provincia de Misiones, no se realizan tareas de fertilización ya que hasta el momento no se encontró una respuesta compensatoria en crecimiento, lo cual no se justifica tal inversión. Un aspecto importante, y con el fin de no disminuir la capacidad productiva del sitio, los residuos de cosecha y del último raleo (ramas finas y hojas) quedarán en el lote. Se realiza un control químico-mecánico para el control de malezas pre y post-plantación, para que resulte satisfactorio la plantación. En el caso de *Pinus taeda* es muy sensible a la presencia de malezas alanzando a morir del 30% de la plantación, lo cual se realiza un desmalezado mecánico, con la ayuda de químicos.

El efecto negativo de las malezas en el crecimiento de *E. grandis* está ampliamente demostrado en estudios locales y de diversas partes del mundo. Las raíces de la nueva plantación y de las malezas se concentran en el suelo superficial donde es más alta la disponibilidad de nutrientes, en particular el nitrógeno y el fósforo. El sistema de raíces de las

malezas, de mayor densidad y más finas, ocupa primero el suelo limitando el crecimiento de las raíces de *E. grandis* y en consecuencia la absorción de nutrientes y agua. En casos extremos, la invasión de malezas puede hacer perder la plantación o aumentar la mortandad hasta porcentajes que no justifican el manejo para producir madera. El control de plantas competidoras es vital, estando ampliamente probado que su presencia disminuye el crecimiento, la homogeneidad y la sobrevivencia. El control de malezas alrededor de las plantas se realiza en forma manual o con herbicidas pre o post emergentes en la banda de plantación. Las principales especies que ocasionan pérdidas por su interferencia y dificultades en el control son: *Solanum sisymbriifolium*, *Cynodon dactylon*, *Sida potentilloides*, *Polygonum convolvulus*, *Paspalum dilatatum*, *P. notatum*, *Conyza bonariensis* y *Baccharis* spp. (Achinelli et al., 2014).

Resultados al segundo año de edad de *E. grandis* en un suelo arenoso de Corrientes revelaron un crecimiento en DAP y altura superior al 30% al comparar el control químico respecto al control con carpidas. Las diferencias son atribuidas al disturbio y ruptura de raíces que producen las carpidas en la zona próxima a las plantas. Por otro lado, la competencia de las malezas por el agua es más crítica en suelos arenosos, de baja retención de humedad. En estos suelos es clave el control de malezas entre las líneas de plantación. Una experiencia realizada en Entre Ríos, demostró que el control total de malezas entre las líneas de plantación con rastra de discos o químicos aumentó el contenido de humedad del suelo respecto a no controlar las malezas o controlar con desmalezadora mecánica. Con relación a lo anterior, si bien los dos métodos de control total de malezas fueron similares en cuanto a la retención de humedad, el control con herbicida es preferente al control con rastra de discos, si se consideran los disturbios que produce esta práctica en el suelo. La baja fertilidad de la mayoría de los suelos de la región limita el crecimiento de *E. grandis*, a pesar de que los eucaliptos en general son considerados eficientes en la utilización de los nutrientes. La respuesta a la fertilización con fósforo aplicado en la etapa de plantación está comprobada en la mayoría de las regiones que en el mundo forestan con *E. grandis*. En general, es una práctica incorporada al establecimiento de las plantaciones. En cuanto al nitrógeno, de mayor movilidad que el fósforo, la respuesta está más asociada al contenido de materia orgánica en el suelo. Respecto al potasio, en general en la región no se han detectado respuestas a la fertilización aplicada al inicio de la plantación. El manejo nutritivo de plantaciones con especies de rápido crecimiento como eucaliptos, no se debe limitar a la fertilización aplicada al establecimiento. Los grandes volúmenes de madera se producen a expensas de una fuerte extracción de nutrientes del suelo, que en parte desaparecen del sistema con la madera extraída durante la cosecha. En rotaciones cortas la remoción de nutrientes puede superar los aportes naturales que recibe el suelo, con lo cual sin la adición de fertilizantes disminuye el estatus nutritivo del sitio. En este contexto, la silvicultura exige una integración de las técnicas de establecimiento, conducción (podas y raleos), cosecha y manejo de residuos, que permitan conservar o mejorar las condiciones físicas y químicas del suelo para mantener una producción rentable y sostenible de madera.

La preparación del sitio en salicáceas se realiza de manera diferencial cuando el sistema plantación es a zanja abierta o en ataja-repunte. El control de malezas es importante durante los primeros años para evitar la competencia con las malezas y disminuir la incidencia de plagas debido a que tienen un importante efecto en la supervivencia y el crecimiento

inicial de los árboles jóvenes, puntualmente en *Populus* sp., que se caracteriza por ser una especie exigente en agua y nutrientes y muy sensible a la interferencia por malezas en la fase de establecimiento. Cuando se plantan en albardones y pajonales con sistemas de zanja abierta, las tareas de desmalezado en el pajonal se realizan de manera mecanizada con motoguadaña o manualmente con machete. En cuanto a los albardones el desmalezado se realiza mediante la combinación de los tratamientos mecánicos mencionados con tratamientos químicos cuya aplicación se realiza con pulverizadoras entre filas y con mochilas pulverizadoras entre tocones remanentes. En cambio, en el sistema de albardones y pajonal con sistemas de ataja-repentes, según las posibilidades de tránsito con maquinaria, el control de malezas es químico-mecánico. Se realiza con rastra de disco y rolos entre las filas, acompañado de motoguadaña o machete entre tocones remanentes. Posteriormente se realiza control químico con (Achinelli et al., 2006).

Las malezas representan un serio problema para el establecimiento de plantaciones de sauces. Se han cuantificado pérdidas de hasta el 60-70% en diámetro y altura, y del 90% en volumen al finalizar el período de implantación (dos a tres años). En álamos se producen pérdidas en supervivencia y crecimiento, habiéndose registrado reducciones en altura de hasta el 50-60% y mermas en la supervivencia de hasta el 84%. Por otro lado, el control de malezas representa aproximadamente el 40% del costo de implantación. En los "pajonales" predominan *Scirpus giganteus* y *Schoenoplectus californicus*, acompañadas por *Typha latifolia*, *Eryngium pandanifolium*, *Rhynchospora corymbosa* y *Polygonum* sp. En zonas endicadas las comunidades están relativamente modificadas y aparecen, entre otras, *Echinochloa crus-galli*, *Paspalum urvillei*, *Carex riparia*, *Cirsium vulgare*, *Conyza bonariensis*, *Ligustrum sinense* y *Morus alba*. El pequeño productor realiza control de malezas manual utilizando machete, guadaña o azadas. Los productores medianos y grandes realizan desmalezados mecánicos y químicos, por ejemplo en los pajonales se realiza el aplastado de la vegetación con rolo y en los albardones se utilizan rastras de discos. Existen buenas respuestas al control con herbicidas, como aplicaciones dirigidas con glifosato e imazaquin en preemergencia, y con quizalofop en post-emergencia. En tal sentido existen puntos clave a tener en cuenta para minimizar los problemas de enmalezamiento: a) control temprano durante la preparación del sitio y luego principalmente en la primera etapa primavero-estival; b) tratamientos químicos selectivos, c) combinación de distintas técnicas de control en un mismo predio como el control químico en bandas en las filas y mecánico en las entrefilas (Achinelli et al., 2014).

No se fertiliza en ninguno de los dos casos ya que los requerimientos nutricionales de las especies se ven abastecidos por las condiciones edáficas del sitio. Por otro lado, se relaciona el contenido de nutrientes en suelos y el consumo de las forestaciones de álamos y sauces, comprobando una adecuada estabilidad para nitrógeno, fósforo total y potasio (Cerrillo et al., 2015). Además, las condiciones hídricas de la región no permiten una aplicación eficiente de fertilizantes debido a las inundaciones periódicas, que provocan la pérdida de estos por el lavado del suelo.

Respecto a las plagas, la más importantes en todos los casos (pinos, eucaliptos y salicáceas) son las hormigas cortadoras, dado que pueden provocar pérdidas en la plantación en los primeros años de vida, generando una disminución en el crecimiento de los árboles e incluso disminuir la sobrevivencia de plantines. Debido a los grandes perjuicios

que ocasionan, las hormigas cortadoras han sido combatidas con diversos métodos, desde culturales hasta químicos. El control químico es el más difundido, y tradicionalmente se basa en la aplicación de hormiguicidas líquidos, en polvo, gases, termonebulización y cebos tóxicos (Della Lucia, 2003). Los cebos tóxicos para el control de hormigas cortadoras se desarrollaron debido a la dificultad de eliminar todos los miembros de la colonia aplicando formulaciones que actúen por contacto, y a consideraciones ambientales, ya que los cebos utilizan mucho menos ingrediente activo por colonia (Cherrett 1989; Montoya-Lerma et al. 2012). La decisión cualitativa de controlar (si o no) viene dada por dos parámetros. Primero, sabiendo si las especies que existen en el predio efectivamente cortan, si cortan hojas de latifoliadas, si prefieren gramíneas, o si solo son recolectoras. En muchos casos, las especies de un predio no son cortadoras, o son recolectoras o cortadoras de pastos exclusivamente, lo que no ameritaría el control. Segundo, estableciendo el nivel de daño mínimo aceptable, el cual viene relacionado con una densidad crítica de las especies que efectivamente cortan hojas. Si cualquier estimación poblacional tendiente a determinar la dosis a aplicar se basa en especies que no causan daño, se sobreestimarán las dosis a aplicar, incrementando innecesariamente los costos ambientales y económicos. Así, la determinación de las especies presentes en un predio mejora la toma de decisión respecto de si controlar o no, y es el paso previo a la aplicación de una dosis basada en niveles de daño relacionados a niveles de infestación. La decisión cuantitativa de qué dosis aplicar se toma basándose en la determinación del nivel de potencial de daño para un nivel de infestación determinado y definiendo una dosis a aplicar en función de esta (Bollazzi, 2018).

De los resultados obtenidos desde 2011 se desprende que la implementación de una reducción de la cantidad de cebos hormiguicida utilizado en el control de hormigas cortadoras se lograría aplicando un control precosecha, el cual es posible debido a la susceptibilidad que exhiben las hormigas cortadoras al sombreado. Al distribuirse el 80% de las colonias en el borde de los rodales al final del turno, un control precosecha y de borde, reduce la superficie a tratar controlando la mayor parte de los hormigueros. En consecuencia, al día de hoy la recomendación de control de hormigas en plantaciones certificadas pasaría por determinar las especies de hormigas cortadoras del área a tratar, y aplicar un control precosecha en borde si la distribución poblacional así lo permite.

4. Destino de la producción actual

La principal fuente de abastecimiento de madera del mundo son los bosques nativos. La superficie forestal total mundial asciende a algo más de 4.000 millones de hectáreas, el 31 por ciento de la superficie terrestre total. La pérdida neta anual de bosques (es decir la suma de las pérdidas menos la suma de los incrementos en superficie forestal) en el periodo 2000-2010 equivale a una superficie similar a la de Costa Rica. Por otra parte, la superficie de bosques implantados se estima que abarca 200 millones de hectáreas (FRA, 2010). El consumo mundial anual de madera es aproximadamente 4.100 millones de metros cúbicos, el 56% de este volumen es utilizado como combustible, fundamentalmente en países subdesarrollados, los cuales poseen la mayoría de las reservas boscosas de especies latifoliadas, y el 44% restante es industrializado, predominando la utilización de

maderas de coníferas. Los principales proveedores de madera de coníferas son Canadá, Estados Unidos, Rusia y Suecia; mientras que, los principales productores y exportadores de madera de latifoliadas son Estados Unidos, Brasil, Malasia e Indonesia.

La competitividad de la cadena forestal depende entre otros factores de la productividad. Los desarrollos tecnológicos, innovaciones y conocimientos que puedan incorporarse o producirse para alcanzar mejores eficiencias o para generar nuevos valores agregados diferenciadores en los productos intermedios y finales, permitirán expandir los mercados existentes nacionales e internacionales. La incorporación de conocimiento en los sistemas productivos y en la producción -mencionados anteriormente-, redundará en un aumento en la eficiencia del manejo de recursos, en la productividad y en la competitividad, aumentando la rentabilidad y los beneficios económicos y sociales para las comunidades involucradas.

La cadena foresto-industrial de Argentina vinculada a las plantaciones forestales comienza con la extracción de rollizos, materia prima que sufre un primer proceso de industrialización a través de la transformación mecánica o química y cuyos productos se destinan a una segunda industrialización. Los productos obtenidos en esta etapa de producción secundaria se destinan luego a otras industrias o al consumo final, tanto en el mercado interno como externo. La mayor parte de las industrias del aserrado, de remanufacturas de la madera y de producción de tableros, se encuentran próximas a los centros de abastecimiento de materia prima, siendo la Mesopotamia el polo foresto-industrial más importante y desarrollado del país (Figura 7). A diferencia de ello, las industrias que incorporan mayor valor agregado, como la del mueble, están instaladas cerca de los principales centros urbanos como Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe. Las inversiones nacionales y extranjeras que recibió el sector en la última década han permitido aumentar tanto la producción para el mercado interno, como las exportaciones de bienes con mayor valor agregado. En el 2012, las industrias de pasta y papel, tableros, laminados e impregnación realizaron inversiones más de 120 mil millones de dólares, correspondiendo a la industria de la pasta y papel el 72% del total invertido, seguida por la industria de tableros con un 26%.

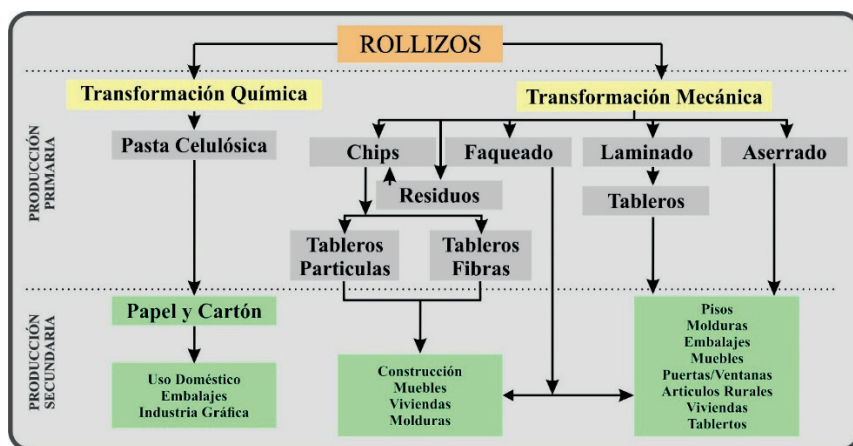


Figura 7. Esquema simplificado de los productos primarios y secundarios obtenidos a partir de un rollizo de madera forestal. Tomado y adaptado de MAGYP-DPF (2014).

Las extracciones de rollizos de los bosques implantados se han incrementado paulatinamente a lo largo de los años, de los cuales el 49% tienen un destino en la industria del aserrado, el 36% a la elaboración de pastas y el 15% a la industria de tableros y otras. En el año 2012 fue de 13 900 000 m³, aproximadamente 11 300 000 tn según el MAGyP – DPF. Más del 50% de la materia prima rolliza consumida por la industria corresponde a la madera de pino, seguida por la de eucalipto, sauce, álamo entre otras especies. La producción total de pastas oscila las 900 000 toneladas en todo el país, y el 71% corresponde a pastas de madera. Dentro de estas, las pastas químicas al sulfato blanqueadas fueron las de mayor producción y las más utilizadas para la elaboración de papel. La especie más utilizada es el pino con un 70.9%, seguido por eucaliptos con un 17.1%. La Argentina históricamente ha sido importadora neta de productos forestales con alto valor agregado (láminas, madera aserrada de bosques nativos y muebles) y exportadora de bienes primarios o semielaborados (rollizos, madera aserrada).

Las salicáceas son utilizadas en la realización de pastas de alto rendimiento (triturado) para la fabricación de distintos tipos de papel y cartón. El sauce, especialmente el *Salix babylonica* var. *sacramenta* ("Soveny americano") es muy apreciado para este fin por el largo de su fibra. Las pastas mecánicas se destinan esencialmente a la fabricación de cartulinas y papeles tisú, las quimi-mecánicas se utilizan como materia prima para producir papeles de impresión, principalmente papel para diarios. Por otro lado, las semiquímicas para elaborar papeles liner y onda para cartón corrugado. El otro destino de la madera triturada es para la realización de diversos tipos de tableros de aglomerado. Se trata de partículas o astillas de virutas de madera aglomeradas entre sí y prensadas en caliente con colas o resinas uréicas o fenólicas. Ambos destinos (pasta y aglomerado) no tienen grandes exigencias con respecto a la calidad de la madera. Se busca que sea lo más blancas posibles, especialmente para pasta. El largo solicitado generalmente es de 2.20 m con diámetro mínimo de 3 pulgadas y máximo de 20 pulgadas, así como evitar los trozos con horquetas y torcidos. En la industria del aserrado los álamos y sauces son utilizados con fines similares. Sin embargo, los álamos son preferidos para algunos destinos, fundamentalmente cuando se requieren piezas de mayores dimensiones y exigencias en resistencia, sumado a su color más claro. Con respecto al sauce, el industrial prefiere para el aserrado al *Salix babylonica* x *Salix alba* "A 131/25" y el "A 131/27". Con madera aserrada se realizan pallets, envases, cajonería en general, encofrados y tirantería, colmenares, ataúdes, mueblería (mesas, sillas, estanterías, placares, etc.), etc. Los rollos de madera utilizada requieren un diámetro entre 5 y 8 pulgadas. Los desperdicios de aserraderos, como ser, costaneros y recortes, se utilizan para hornos de panadería y pizzerías para su quema. Muchas veces los mismos se entregan a cambio de su retiro de los aserraderos. Otros productos de las salicáceas son los postes o tutores sin aserrar, que también son utilizados en las vigas para la construcción de viviendas económicas, tinglados, cobertizos, etc.

5. Avances en la utilización de productos y subproductos con destino bioenergético

Previo a la revolución industrial, la biomasa fue el combustible mayormente utilizado por el hombre. Sin embargo, a mediados del siglo XVIII, la aparición de mayores consumos

de energía en las máquinas de vapor llevó al empleo de carbón como combustible principal. Luego, el uso masivo de combustibles derivados del petróleo, que tiene un mayor poder calorífico y que también en aquel entonces presentaban un menor costo, redujo al mínimo la utilización de biomasa.

Con el transcurrir de los años y en la actualidad surgieron diferentes inconvenientes asociados a la utilización de combustibles de origen fósil. Por un lado, a nivel mundial existe un constante incremento en el consumo de energía, lo que conlleva a serios problemas que deben ser resueltos en el corto plazo. Las mayores reservas de combustibles fósiles están localizadas en algunos países, causando una gran volatilidad en los mercados y problemas de abastecimiento en distintas zonas. Otro punto clave, y del cual se ha empezado a tomar conciencia en las últimas décadas, es que el uso de combustibles fósiles causa serios problemas ambientales, como la contaminación del aire, lluvia ácida y las emisiones de gases de efecto invernadero. Una solución a estos problemas es el desarrollo de energías limpias y renovables de origen biomásico, ya que pueden ser producidas y consumidas en un ámbito de CO₂ neutro. Cuando se produce la combustión de la biomasa, el CO₂ generado es luego reabsorbido mediante la fotosíntesis en el crecimiento de las plantas necesarias para su producción y, por lo tanto la cantidad de CO₂ presente en la atmósfera no se ve incrementada. En cambio, en el caso de los combustibles fósiles, el carbono que se libera a la atmósfera es el que está fijo a la tierra desde hace millones de años. Otra ventaja es que además existe elevada disponibilidad de biomasa a nivel mundial, y en diferentes regiones del planeta.

La bioenergía es una energía renovable producida de materiales derivados de fuentes biológicas. Los recursos biomásicos se encuentran disponibles en distintas formas o tipos, incluyendo cultivos energéticos dedicados, residuos de agricultura, residuos forestales, plantas acuáticas, desechos humanos y animales, desechos municipales, etc. Una gran ventaja de la utilización de recursos biomásicos para la generación de energía es que pueden producir combustibles líquidos, gaseosos y sólidos, y que pueden ser almacenados, transportados y utilizados con los mismos sistemas de abastecimiento de los combustibles fósiles.

Desde el punto de vista del aprovechamiento energético, la biomasa se caracteriza por tener un bajo contenido de carbono, un elevado contenido de oxígeno y compuestos volátiles. Estos compuestos volátiles (formados por cadenas largas del tipo C_nH_m, y presencia de CO₂, CO e H₂) son los que concentran una gran parte del poder calorífico de la biomasa. El poder calorífico de la biomasa depende mucho del tipo de biomasa considerada y de su humedad. Así normalmente estos valores de poder calorífico de la biomasa se pueden dar en base seca o en base húmeda. En general se puede considerar que el poder calorífico de la biomasa puede oscilar entre los 3000 a 3500 kcal/kg para los residuos ligno - celulósicos, los 2000 a 2500 kcal/kg para los residuos urbanos y finalmente las 10 000 kcal/kg para los combustibles líquidos provenientes de cultivos energéticos. Estas características, juntamente con el bajo contenido de azufre de la biomasa, la convierten en un producto especialmente atractivo para ser aprovechado energéticamente.

En la República Argentina se han realizado y se realizan en la actualidad aprovechamientos energéticos de la biomasa. En la provincia de Jujuy, más precisamente en la industria siderúrgica Altos Hornos Zapla, se emplea carbón vegetal como combustible, que

se obtiene como aprovechamiento de la biomasa generada fundamentalmente a partir de plantaciones de eucalipto realizadas para ese fin. Este carbón vegetal también se utiliza en otras industrias y para uso doméstico, aunque su importancia comparativa es mucho menor. Otro ejemplo de aprovechamiento significativo es la utilización de bagazo de caña de azúcar como combustible para las calderas de los ingenios azucareros principalmente localizados en el noroeste argentino (NOA). En algunos casos, estas industrias prácticamente alcanzan la autosuficiencia energética con este combustible. La fabricación de alcohol a partir de la caña de azúcar y su dosificación en las naftas (alconaftas) fue un proyecto llevado a cabo por distintas provincias, pero no prosperó por diversos factores económicos y estructurales del país.

Por otra parte, algunos ejemplos en el aprovechamiento de biomasa en Argentina pueden ser: a) la utilización de leña a nivel doméstico en zonas rurales y semirurales, para calefacción en hogares; b) el empleo de residuos agroindustriales (cáscara de girasol, cáscara de arroz, cáscara de maní, etc.) en calderas para su uso térmico o eléctrico, para producir vapor de proceso; c) el uso de residuos forestoindustriales (aserrín, costaneros y viruta) para generar energía en la industria de transformación de la madera; d) la utilización de LFG (gas metano capturado en rellenos sanitarios) para generación de energía eléctrica; y e) la generación de biogás en tambos, actualmente muy poco difundido. En virtud de lo mencionado anteriormente, nuestro país se encuentra en una etapa de desarrollo bioenergético donde el grado de utilización de biomasa es mucho menor al potencial de aprovechamiento energético disponible. Por tal motivo, es importante trabajar en la tarea de difusión de las posibilidades existentes y de las tecnologías para su uso.

Es interesante analizar el caso de los residuos producidos por el sector forestal, que representan un gran potencial biomásico para la producción de bioenergía en Argentina. Se considera que más del 70% de la biomasa producida en las plantaciones argentinas no tiene uso alguno, la mayoría de los residuos de los aserraderos se queman, aumentando de esta manera las emisiones de CO₂ a la atmósfera. No obstante, el éxito de la utilización de estos residuos depende mayormente de dos parámetros; confiabilidad del abastecimiento sostenible de biomasa y en los costos incurridos en el procesamiento de la biomasa. Por lo tanto, existe una necesidad urgente de desarrollar metodologías que puedan claramente cuantificar la biomasa forestal, como así también identificar riesgos e incertidumbres sobre la disponibilidad de biomasa para la generación de bioenergía. En la Argentina, existen algunos proyectos de cogeneración alimentados con biomasa forestal, ya sea con residuos del procesamiento mecánico de la madera (aserrín, corteza, costaneros) y de desechos o residuos forestales o de cosecha (despunte, ramas, tocones). Se han realizado estudios en la provincia de Entre Ríos que permiten cuantificar los residuos forestales. Los resultados preliminares indican que los bosques implantados producen alrededor de 250 tn·ha⁻¹ en un turno de corte (16 años) y además, quedan 12 tn·ha⁻¹ de biomasa que no se retiran, de las cuales un 50% son triturables y el resto es material no aprovechable. Los rollizos en aserraderos presentan un rendimiento variable dependiendo de las tecnologías empleadas y los productos generados. Sin embargo, se estiman que el 50% corresponden a subproductos o residuos de la industria maderera. Teniendo en cuenta los siguientes supuestos, la cantidad estimada de residuos disponibles en la actividad forestal primaria y foresto-industrial de Entre Ríos puede variar entre 800 000 a 950 000 tn·ha⁻¹ con una humedad media del 40%.

Sin embargo, debe tener en cuenta que ese material puede utilizarse como materia prima para papel o tableros, y la diferencia podría utilizarse con fines energéticos (700 000 tn·año⁻¹ a 850 000 tn·año⁻¹). Teniendo en cuenta un poder calorífico de 2450 kcal.kg⁻¹, 8000 h anuales de operación que generan 90 tn·ha⁻¹ de residuos y un rendimiento global del 25%; se podría generar 64 Mw.

5.1. Legislación en Argentina y marco institucional.

La Ley Nacional N° 26.190 declara de interés nacional la generación de energía eléctrica a partir del uso de fuentes de energía renovables con destino a la prestación de servicio público como así también la investigación para el desarrollo tecnológico y fabricación de equipos con esa finalidad. Establece el "*Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica*", teniendo como objetivo lograr la contribución de las fuentes de energía renovables hasta alcanzar el 8% del consumo de energía eléctrica nacional en el plazo de 10 años. En el marco de esta ley se presenta como beneficios un régimen de inversión por un periodo de 10 años y una remuneración adicional respecto del precio de mercado de la energía según las distintas fuentes por un periodo de 15 años. Existen distintas instituciones involucradas de distintas maneras con los estudios de aprovechamiento de Biomasa en Argentina. Entre ellas se mencionan la FAO (Food and Agriculture Organization); Secretaría de Energía; Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos; INTA; Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Se está trabajando en el desarrollo de tecnología para un Sistema de Información Geográfica (SIG), con el objetivo de combinar o integrar información estadística y espacial sobre la producción (oferta) y el consumo (demanda) de combustibles biomásicos (residuos forestales, forestoindustriales, agrícolas y agroindustriales) y biocombustibles. El objetivo es conformar una herramienta tal que permita la toma de decisiones en función del plan estratégico energético con el objetivo de diversificar la matriz energética nacional y avanzar de acuerdo a los lineamientos establecidos en la Ley de Fomento de Energía Renovables N° 26.190.

5.2. Líneas de desarrollo científico en la región

En el Instituto de Investigaciones en Catálisis y Petroquímica (INCAPE) – UNL - CONICET existen distintos grupos de investigación que abordan temas relacionados con el aprovechamiento de la biomasa para distintas rutas energéticas o de producción de compuestos de alto valor agregado. Entre las distintas líneas de investigación pueden mencionarse:

5.2.1. Aprovechamiento de biomasa lignocelulósica para producción de combustible líquido

A través de un proceso de Pirólisis Rápida (*Fast Pyrolysis*) la biomasa lignocelulósica sólida puede ser convertida eficientemente en un "bio-oil" (Onay, 2007). Sin embargo, debido a su alto contenido de oxígeno su alta viscosidad, bajo poder calorífico, corrosividad e inestabilidad es necesario someterlo a un proceso de purificación para mejorar sus propiedades combustibles (Agblevor y Besler, 1995). El proceso integrado por las etapas de pirólisis rápida, craqueo y desoxigenación catalíticos, donde los vapores de la pirólisis se alimentan directamente a un reactor catalítico con o sin utilización de H₂ como reactivo para ser

transformados en hidrocarburos desoxigenados, es el proceso más simple y efectivo que se ha identificado para obtener biocombustibles líquidos de bajo costo (Wang et al., 2013).

Los estudios existentes se enfocan en mejorar el octanaje y disminuir solubilidad con agua de bio-oils. Como punto de partida, se trabaja con compuestos modelo del bio-oil, para obtener los caminos de reacción y correlaciones entre rendimientos catalíticos y estructuras de los catalizadores. Hasta el momento se obtuvieron muy buenos resultados con catalizadores metálicos soportados en presencia de H₂ a presión atmosférica cuando se usó cresol, anisol y fenol como molécula modelo (Zanuttini et al., 2013). Para este proceso catalítico de hidrodeshidrogenación (HDO) los catalizadores metálicos (con énfasis en metales no preciosos, como hierro que permite disminuir notablemente los costos de catalizador y, consecuentemente, del proceso) soportados sobre sílices levemente ácidas han mostrado muy buenos resultados (Zanuttini et al., 2013). El furfural es uno de los numerosos componentes oxigenados que se encuentran en alta proporción en bio-oils (Onay, 2007). Además, este compuesto se genera a partir de la conversión de azúcares C5 como resultado de la producción de etanol de segunda generación. Por otro lado, se han estudiado catalizadores monometálicos de hierro en HDO de furfural en fase gas a presión atmosférica en presencia de H₂, obteniendo selectividades del 90% a 2-MF. Sin embargo, este catalizador presenta baja estabilidad. Además, se trabajó con catalizadores bimetálicos de hierro con una pequeña cantidad de platino, en particular, para comprender la sinergia entre los metales y cómo su proporción afecta la conversión de furfural y selectividad a 2-metilfuran, así como la desactivación y regeneración del catalizador.

5.2.2. Producción de bio-hidrógeno a partir de hidrocarburos oxigenados derivados de biomasa

La producción de bio-hidrógeno mediante reformación en fase acuosa (proceso APR) a partir de hidrocarburos oxigenados derivados de biomasa, es un proceso atractivo cuando se utilizan reactivos que son inestables a temperaturas relativamente bajas. Además, el proceso APR elimina la necesidad de vaporizar la alimentación líquida y mejora de esta manera la eficiencia térmica del proceso. Nosotros estudiamos el desarrollo de nuevos catalizadores bifuncionales metal/ácido para el proceso APR empleando como alimentación polioles (xilitol, sorbitol, glicerol) con el objetivo de mejorar los rendimientos a hidrógeno que se obtienen con las actuales formulaciones catalíticas.

5.2.3. Producción de combustibles líquidos para transporte a partir de derivados de la biomasa

La conversión del 2-hexanol (resultante de la transformación primaria de azúcares) en precursores de combustibles (hidrocarburos y oxigenados) se encuentra en estudio para ser aplicado en la gasolina (C5-C12), el combustible de aviones (C9-C16) y en el diesel (C12-C20). La síntesis en fase gaseosa emplea catalizadores bifuncionales que combinan un sitio metálico y uno básico capaces de promover el proceso tándem de deshidrogenación/condensación, aldólica/deshidratación/hidrogenación en un único reactor.

5.2.4. Producción de aditivos para combustibles diesel

El ácido levulínico es derivado directo de biomasa y constituye una importante plataforma química para la obtención de biocombustibles y aditivos para diesel como ser la gama-valerolactona, valerato de pentilo y pentanol. Estos productos se pueden obtener

mediante reacciones catalíticas en tándem en procesos *one-pot* usando sistemas catalíticos bifuncionales metal/ácido. El objetivo de esta línea de investigación es estudiar el efecto de estas funciones catalíticas sobre el rendimiento obtenido de dichos productos.

5.2.5. Rutas de valorización de biomasa

La valorización de polioles, tales como el 1.3-butanodiol y 1.4-butanodiol, se estudia mediante reacciones de deshidratación y deshidrogenación. Específicamente, es de interés la producción en fase gas de valiosos alcoholes, aldehídos, olefinas, cetonas e hidroxicetonas, de amplia aplicación como aditivos e intermediarios en la síntesis de polímeros y químicos finos, entre otros. La cuidadosa selección de los sitios activos del catalizador (ácidos, básicos, metálicos o combinaciones de los mismos) permite direccionar la reacción hacia uno u otro producto. Por otra parte, la hidrólisis de polisacáridos en las biorefinerías genera azúcares que pueden convertirse en valiosos compuestos químicos polifuncionales de aplicación industrial. En este sentido es importante continuar con los estudios relacionados a la síntesis de butanodios a partir de azúcares C4 y C5, mediante reacciones de decarbonilación e hidrogenólisis. Los butanodios se obtienen en la actualidad a partir de derivados del petróleo y son de amplia utilización en la producción de poliésteres, resinas y plastificantes. Además, es importante considerar la síntesis de lactato de etilo (EL) y dietilacetal de aldehído pirúvico (PADA) a partir de triosas como la dihidroxiacetona, la cual se obtiene por retroaldolización de azúcares.

Otro aspecto por considerar es la síntesis de γ -butirolactona a partir de ácido succínico y anhídrido maleico. El ácido succínico es un compuesto versátil que puede obtenerse por fermentación de la glucosa. A través de reacciones sucesivas de deshidrogenación y deshidratación, el ácido succínico puede ser convertido en anhídrido maleico. A partir de este compuesto, por hidrogenación-hidrogenólisis selectivas, se obtiene γ -butirolactona, la cual es empleada como solvente específico, en reemplazo de solventes clorados, y como intermediario en la síntesis de productos farmacéuticos, agroquímicos y polímeros. Nuestro grupo estudia la síntesis en una etapa de γ -butirolactona a partir de anhídrido maleico, empleando metales no-nobles (Ni, Cu, Co, Fe) soportados sobre distintos óxidos mixtos ácidos, tanto meso como microporosos.

El ácido láctico se produce comercialmente por fermentación de glucosa. Es extremadamente reactivo, dado que contiene grupos funcionales ácidos e hidroxílicos, y puede en consecuencia experimentar numerosas reacciones que conducen a la obtención de productos químicos valiosos. Una línea de trabajo en Argentina consiste en desarrollar catalizadores sólidos que conviertan selectivamente el ácido láctico a ácido acrílico por deshidratación o bien, a acetaldehído por decarboxilación. Es un tema atractivo en el campo de la síntesis de nuevos bio-compuestos porque actualmente ambos productos son totalmente obtenidos a partir de materia prima fósil, principalmente por oxidación de propeno y etileno.

6. Conclusiones

Como se ha mencionado en apartados anteriores, la Mesopotamia Argentina posee un potencial productivo de gran magnitud. Hasta el momento, el destino del patrimonio

forestal implantado está enfocado en la industria maderera y celulósica. Bajo este sistema y concepto de producción, el encuadre de los principios bioenergéticos se centra en el aprovechamiento de los subproductos de la cadena forestoindustrial. En la actualidad con las condiciones coyunturales de la región han impedido diseñar un sistema forestal con destino energético. En este aspecto se produce una bifurcación de supuestos: por un lado, surge el interrogante de la viabilidad económica-financiera de este destino; y por otro, asociado al primero, sobre el mercado potencial de la región. Este último puede estar asociado a un bajo costo de la energía con fuentes convencionales y a una baja demanda de consumo local que no superan la oferta disponible.

Sin embargo, frente a los escenarios conocidos de disminución de las fuentes energéticas derivados de combustibles fósiles, es necesario e indispensable diseñar de un plan de reconversión energética en la región que incluya diferentes fuentes de biomasa. En este sentido, el sector forestal sería de gran contribución. Desde el punto de vista técnico, la región presenta un potencial ampliamente conocido, pero aún restan conocer los resultados de la viabilización económica de los proyectos.

Bibliografía

- Achinelli, F.G., Aparicio, A., Delgado, M., Jouanny, M., Marlats R.M. (2006). Malezas en las forestaciones con Salicáceas del Delta del Paraná: efectos netos de las interacciones y respuesta del cultivo a distintos tratamientos de control. *Actas de las Jornadas Nacionales de Salicáceas 2006*, Facultad de Agronomía de la UBA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires: 199-206 pp.
- Achinelli, F.G., Martínez-Pastur, G., Frangi, J.L. (2014). Manejo de malezas en bosques nativos y plantaciones forestales. Enfoques y problemas vinculados con el manejo de malezas en la producción forestal de la Argentina. 705-729 pp. En: *Malezas e invasoras de la Argentina: Tomo I Ecología y Manejo*. Fernandez, O.E., Leguizamón, E.S., Acciaresi, H.A. (Eds). Editorial de la Universidad Nacional del Sur. Ediusn, 964 pp.
- Agblevor, F.A., Besler, S., Wiselogel, A.E. (1995). Fast Pyrolysis of Stored Biomass Feedstocks. *Energy&Fuels*, 9(4): 635-640. <https://doi.org/10.1021/ef00052a010>
- Aparicio J.L., Larroca, F., Dalla Tea, F. 2005. Silvicultura de Establecimiento de *Eucalyptus grandis*. *IDIA INTA XXI*, 5(8).
- Aparicio, J.L., Lopez (h), J.A., Caniza, F. (2006). Respuesta de *Pinus elliottii*, *Pinus taeda* y Pino híbrido a cuatro técnicas de preparación del terreno en el sudoeste de Corrientes. In: *Actas Jornada Forestal* (Conmemoración 50 años de INTA). Lavalle, Corrientes. 1-13 pp.
- Atencia, M.E. (2010). Usos sólidos de madera de sauce: tecnología de corte y secado. *Actas Jornada Técnica Sauce*. EEA Delta, INTA. ISSN 1514-3910. 62-73 pp.
- Baez, M., Pezzutti, R. (2014). Capítulo 7. Plantación. En: *Guía de buenas prácticas forestales para la provincia de Corrientes*. Saiz, E., Bravo, C., Luna, C.V. (eds). ISBN 978-987-521-582-5. Ediciones INTA. 102 pp.
- Balmelli, G. (1995). Ensayos de orígenes de *Eucalyptus globulus*: evaluación al 3er. Año. *INIA Serie Técnica*, 14 pp.

- Boland, D.J., Brooker, M.I.H., Chippendale, G.M., Hall, N., Hyland, B.P.M., Johnston, R.D., Kleinig, D.A., McDonald, M.W., Turner, J.D. (2006). *Forest Tree of Australia*. 5th Edition. ISBN: 978-06-43069701. CSIRO Publishing. 736 pp. <https://doi.org/10.1071/9780643069701>
- Bollazzi, M. (2018). Manejo de hormigas cortadoras del género *Acromyrmex* en el marco de la certificación forestal en Uruguay. *XXXII Jornadas Forestales de Entre Ríos*, Concordia Octubre 2018. 3 pp.
- Borodowski, E.D., Suárez, R.O. (2004). *El cultivo de álamos y sauces: su historia en el Delta del Paraná*. SAGPyA Forestal.
- Borodowski, E.D., Suarez, R.O. (2006). *Álamos y sauces en el Delta del Paraná: situación del sector y silvicultura*.
- Borodowski E.D., Suárez, R.O. (2005). *Caracterización forestal de la región del Delta del Paraná*. Documento NEF Delta – Proyecto Forestal de Desarrollo – SAGPyA. 8 pp.
- Borodowski, E.D. (2006). *Álamos y sauces en el Delta del Paraná: situación del sector y silvicultura*. *Actas Jornadas de Salicáceas 2006*. Disertación. 61-70 pp. ISSN 1850-3543
- Braier G. (2004). *Estudios de tendencias y perspectivas del sector forestal en América latina al año 2020*. Informe Nacional Argentina. FAO, SAGyA.
- Casaubon, E., Peri, P. L., Cornaglia, P., Cueto, G., Rossi, C., Gonzalez, A. (2009). Establecimiento de sistemas silvopastoriles en el delta del río Paraná: Evaluación del daño animal. 1° *Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles*. Posadas. Misiones.
- Cerrillo, T., Álvarez, J.A., Álvarez, J.L., Battistella, A., Braccini A. (2015). La forestación de Salicáceas como aporte al desarrollo sustentable del Delta del Paraná. *XXIX Jornadas Forestales de Entre Ríos*, Concordia Septiembre 2015. 14 pp.
- Cherrett, J.M., Cherrett, F.J. (1989) A bibliography of the leaf-cutting ants, *Atta* spp. and *Acromyrmex* spp., up to 1975. *Overseas Dev. Nat. Resour. Inst. Bull.* 14: 1-58
- Della-Lucia, T.M.C. (2003). Hormigas de importancia económica en la región Neotropical. In: Fernandez F (ed) *Introducción a las hormigas de la Región Neotropical*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexer von Humboldt, Bogota, 337-349 pp.
- Di Marco, E. (2014). *Eucalyptus grandis* Hill Ex. Maiden (eucalipto rosado) Familia Mirtáceas. Ficha Técnica DPF: 36-37.
- Di Marco, E. (2015). *Eucalyptus globulus* sp. *globulus* Labill (Eucalipto blanco) Familia Myrtaceae. Ficha Técnica DPF: 34-36.
- Escobar, E.H., Ligier, H.D., Melgar, R., Mattelo, H., Vallejos, O. (1996). *Mapa de suelos de la provincia de Corrientes 1:500 000*. Área de Producción Vegetal y Recursos Naturales E. E. A. INTA-Corrientes. 432 pp.
- Fassola, H.E. (2004). El cultivo de pino taeda en Misiones y NE de Corrientes, Argentina. *Euskadi Forestal N° 67*.
- Ferrere P., López G. A., Boca R. T., Galletti M. A., Esparrach C. A. y Pathauer P. S. (2005). Efecto de la densidad de plantación sobre el crecimiento de *Eucalyptus globulus* en un ensayo Nelder modificado. *Invest Agrar: Sist Recur For.* 14(2): 174-184. <https://doi.org/10.5424/srf/2005142-00882>
- FRA. (2005). *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2005*. ISBN 92-5-305481-6. Estudio FAO: Montes 147. Roma, 320 pp.
- FRA. (2010). *Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2010*. ISBN 978-92-5-106654-6. Estudio FAO: Montes 163. Roma, 340 pp

- Gonçalves, J.L.d.M., Stape, J.L., Laclau, J.P., Smethurst, P., Gava, J.L. (2004). Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 193: 45-61. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.022>
- Goya, J.F. (2004). Análisis del ciclo de nutrientes en *Eucalyptus grandis* de dos edades de plantación en el NE de Entre Ríos. Trabajo Presentado en el XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Argentina.
- Hampel, H. (2005). El potencial de Negocio de Especies Forestales No Tradicionales en Misiones, Argentina. Manejo y Gerenciamiento de *Grevillea robusta*, *Melia azedarach*, *Paulownia* sp y *Toona ciliata*” Tesis de Maestría en Administración Estratégica de Negocios. Facultad de Ciencias Económicas. Universidad Nacional de Misiones.
- Holliday, I. (1989). *A Field Guide to Australian Trees*. Melbourne: Hamlyn Australia. pp. 198.
- Judd, T.S. (1996). Simulated nutrient losses due to timber harvesting in highly productive eucalypt forest and plantations. In: Attiwill, P.M., Adams, M. (eds). *Nutrition of Eucalypts*, CSIRO Publishing, 249-258 pp.
- Ligier, D., Matteio, H., Polo, H., Rosso, J. (1990). *Atlas de suelos de la República Argentina. Misiones*. Secretaría de Agricultura, Ganadería Pesca. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro de investigaciones de Recursos Naturales, Buenos Aires. Tomo II: 41 pp.
- Lupi, A.M., Fernandez, R., Pahr, N., Martiarena, R., Pezzutti, R., Hernandez, A. (2005). *En el NE de Corrientes: Pinos en tierras bajas*. IDIA-INTA XXI; 90-94 pp.
- Marcó, M., Harrand, L., Traverso, J., Gelid, P. (2000). Evaluación del crecimiento y adaptación al 5° año de *Eucalyptus maidenii* y *Eucalyptus globulus* en la región de Concordia, Entre Ríos. *Primer Seminario Internacional del Eucalyptus globulus en la Argentina*.
- Martiarena, R., Frangi, J.L., von Wallis, A., Arturi, M.F., Fassola, H.E., Fernandez, R. (2014). Propiedades del suelo y sus relaciones con el IS en plantaciones de *Pinus taeda* L. en la Mesopotamia Argentina. *AUGMDOMUS*, 6: 48-65.
- Montoya-Lerma, J., Giraldo-Echeverri, C., Armbrecht, I., Farji-Brener, A., Calle, Z. (2012). Leaf-cutting ants revisited: Towards rational management and control. *International Journal of Pest Management*, 58(3):225-247. <https://doi.org/10.1080/09670874.2012.663946>
- Onay, O. (2006). Influence of pyrolysis temperature and heating rate on the production of bio-oil and char from safflower seed by pyrolysis, using a well-swept fixed-bed reactor. *Fuel Processing Technology*, 88:523–531. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.01.001>
- Pathauer P. (2005). Subprograma Eucaliptos y Pinos en la Región Pampeana. Mejores Árboles para más Forestadores. Proyecto Forestal de Desarrollo.
- Pezzutti, R., Caldato, S., Roth, V. (2014). *Malezas en plantaciones de Pinus y Eucalyptus de la Mesopotamia Centro-Norte. Malezas e Invasoras de la Argentina*. Tomo I, Ecología y Manejo. EdiUNS. Buenos Aires. 716 pp.
- SAGyP-INTA. (1995) (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (1995)). Manual para Productores de Eucaliptos de la Mesopotamia Argentina. 162 pp.
- Sánchez Acosta, M. (2015). *Jornada sobre usos sólidos de la madera*. EEA Delta del Paraná. No editado.

- Sandoval-Lopez, D.M., Arturi, M.F., Goya, J.F., Pérez, C.A., Frangi, J.L. (2018). *Eucalyptus grandis* plantations: effects of management on soil carbon, nutrient contents and yields. *Journal of Forestry Research*, 31: 601-611. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0850-z>
- Sivananthawerl, T., Mitlohner, R. (2011). *Eucalyptus grandis* and other important Eucalyptus species. Sven G Nter, Sven Günter, Michael Weber, Bernd Stimm, Reinhard Mosandl, ed. *Silviculture in the Tropics*. Springer. pp. 465-470. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19986-8_29
- Teson, N. (2011). Balance hidrológico y flujo de nutrientes asociados al agua en plantaciones de *Eucalyptus grandis*, en Concordia (Entre Ríos). Tesis de Doctor en Ciencias Naturales. Universidad Nacional de la Plata. 201 pp.
- Turner, J., Lambet, M.J. (1996). Nutrient cycling and forest management. In: Attiwill, P.M., Adams, M. (eds). *Nutrition of Eucalypts*, CSIRO Publishing, 229-248 pp.
- Wang, K., Brown, R.C., Homsy, S., Martinez, L., Sidhu, S.S. (2013). Fast pyrolysis of microalgae remnants in a fluidized bed reactor for bio-oil and biochar production. *Bioresour. Technol.*, 127: 494-499. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.016>
- Wrigley, J., Murray, F. (2010). *Eucalypts: A Celebration*. Allen & Unwin. pp. 84, 157, 217.
- Zanuttini, M., Lago, C., Querini, C., Peralta, M. (2013). Deoxygenation of m-cresol on Pt/ γ -Al₂O₃ catalysts, *Catal. Today*, 213:9-17. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.04.011>

Caña de azúcar en Argentina: situación actual y uso para fines bioenergéticos

José María García¹, Catalina Molina², Alberto Acevedo^{2*}, Mariana Paola Silva³, Leonardo Darío Gómez³, Luis Ernesto Erazzú¹

¹Estación Experimental Agropecuaria Famaillá, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Ruta Provincial 301 km 32, 4132 Famaillá, Tucumán, Argentina.

²Instituto de Suelos, Centro de Investigación de Recursos Naturales, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Los Reseros y Las Cabañas s/n, Castelar 1712, Buenos Aires, Argentina.

³CNAP, Department of Biology, University of York, Heslington, York YO10 5YW, UK.

*Autor para correspondencia: acevedo.alberto@inta.gob.ar

1. Introducción

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un cultivo industrial producido en más de 100 países tropicales y subtropicales en todo el mundo. Perteneció a la familia *Poaceae* (o *Gramineae*) y es originario del sudeste asiático y Nueva Guinea. Las reservas energéticas de la planta se ubican principalmente en la parte aérea, especialmente en los tallos, en donde se concentra la sacarosa, celulosa, hemicelulosa y lignina.

El cultivo de caña es utilizado principalmente para la producción de azúcar y etanol a partir de la fermentación de azúcares presentes en el jugo del tallo. A nivel global, cuenta con una superficie cosechable de 26 millones de ha y un peso de cosecha de 1.84 billones de tn, el cual es el mayor entre todos los cultivos (FAO, 2017).

En los últimos años, ha sido considerado entre los principales cultivos energéticos debido a su gran capacidad de producción de biomasa lignocelulósica por unidad de superficie (BNDES, 2008). Además del bagazo, subproducto resultante del procesamiento de tallos para la industria azucarera, la biomasa mencionada incluye el residuo agrícola de cosecha (RAC), compuesto por la porción superior inmadura del tallo (despunte) y las hojas de la planta.

La generación de energía a partir de la biomasa de la caña de azúcar se ha convertido en una alternativa sustentable a las fuentes convencionales, no renovables, como lo son el petróleo, el carbón y el gas natural. Esto se ve reflejado en el trabajo que llevan adelante

desarrollar tecnologías que aumenten la eficiencia de producción de combustibles y en consecuencia, su competitividad con otras disponibles actualmente.

2. Características del cultivo

La caña de azúcar es un cultivo semi-perenne que puede ser aprovechado comercialmente en varias cosechas anuales, comúnmente 4 o 5. El primer ciclo productivo del cultivo, que transcurre desde la plantación hasta su primer corte, es llamado *caña planta* mientras que los ciclos posteriores son denominados *caña soca 1*, *soca 2*, sucesivamente.

Alcanzar un establecimiento adecuado del cultivo en la plantación es vital para garantizar el éxito del cultivo en los años posteriores. La propagación del cultivo se realiza de forma asexual mediante la plantación de tallos de la caña de azúcar, mientras que la obtención de semilla botánica es de interés únicamente por los programas de mejoramiento para la generación de variabilidad genética. Durante la plantación, se abren surcos a la distancia de 1.6 m., en los cuales los tallos son colocados y troceados manualmente (plantación manual) o colocados ya en trozos (plantación mecanizada) mediante el empleo de maquinaria especializada; y luego tapados mediante el uso de implementos agrícolas. A partir de las yemas ubicadas en los nudos del tallo se originan nuevas plántulas que dan inicio al ciclo del cultivo, el cual está formado por las siguientes fases que caracterizan su desarrollo y crecimiento (Romero et al., 2009):

1. *Emergencia y establecimiento de la población inicial de tallos o Brotación*: la planta aumenta el número de hojas por tallo.
2. *Macollaje y cierre del cañaver*: la principal característica de esta fase es el aumento de la cantidad de tallos. Se define el número potencial de órganos cosechables que tendrá cada cepa, compuestos por tallos principales, secundarios y eventuales terciarios. La cantidad de macollos varía mucho dependiendo de cada cultivar. Las láminas foliares se expanden, mientras que el número de hojas verdes no se incrementa significativamente. De esta forma, el índice de área foliar es mayor.
3. *Determinación del rendimiento cultural* (Período de gran crecimiento): en esta fase se comienza la acumulación de sacarosa en los entrenudos de la planta. A su vez, se determinan el número y el peso fresco final de tallos.
4. *Madurez y definición de la producción de azúcar*: se define el contenido final de sacarosa en los tallos y la producción de azúcar por unidad de área.

La cosecha puede realizarse de forma manual, semi-mecanizada o mecanizada (también llamada cosecha integral). En Argentina, casi la totalidad de la superficie es cosechada de forma mecanizada, tecnología que permite realizar las tareas de corte de tallos (a nivel del suelo), despunte (corte de la porción inmadura superior), troceado de los tallos y carga, en una sola operación para su posterior traslado al ingenio.

3. Importancia de la caña de azúcar en Argentina

A partir de imágenes satelitales, se pudo observar que la caña de azúcar en Argentina ocupó 376.223 ha durante 2018. Tucumán, fue la provincia argentina con mayor superficie

cultivada con 273.737 ha, la cual representa el 73% del total del país; seguida de las provincias Salta y Jujuy, y en menor medida por las provincias de Misiones y Santa Fe (Benedetti, 2018).

La producción de caña de azúcar de la temporada 2018/19 alcanzó los 21,5 millones de tn en el país, de las cuales 16,8 millones de tn se emplearon para la producción de azúcar y 4,7 millones de tn para la producción de bioetanol de primera generación (B1G) (USDA GAIN Report, 2019). La producción nacional de azúcar para la campaña de comercialización 2018/19 alcanzó 1,66 millones de tn (valor bruto). De esta cantidad, 1,57 millones de tn fueron destinadas a consumo interno y 187,000 tn. fueron exportadas (USDA GAIN Report, 2019). La producción de B1G de caña de azúcar, que se obtiene por fermentación de jugos de caña de azúcar o melaza, alcanzó los 528,162 m³ durante la misma campaña. Este valor representó el 47% de la producción nacional de este biocombustible, situando a la caña de azúcar como el segundo cultivo productor del país (Secretaría de Gobierno de Energía, 2019).

Argentina cuenta con 22 ingenios azucareros, de los cuales 15 se encuentran en la provincia de Tucumán; lo cual evidencia el rol protagónico que ostenta esta provincia en la cadena productiva nacional de caña de azúcar (Ministerio de Hacienda, 2018). De los 15 ingenios que se encuentran en Tucumán, 11 poseen destilerías para la producción de B1G (Bella Vista, Concepción, Famaillá, La Corona, La Florida, La Trinidad, Leales, Marapa, San Juan, Santa Bárbara y Santa Rosa) (Ortiz, 2018). También, aunque en menor medida, el norte del país cuenta con establecimientos que producen alcohol, 2 en Salta (Alconoa SRL y Bio San Isidro SA) y 2 en Jujuy (Bio Ledesma SA y Río Grande Energía) (Ministerio de Hacienda, 2018) (Figura 1).

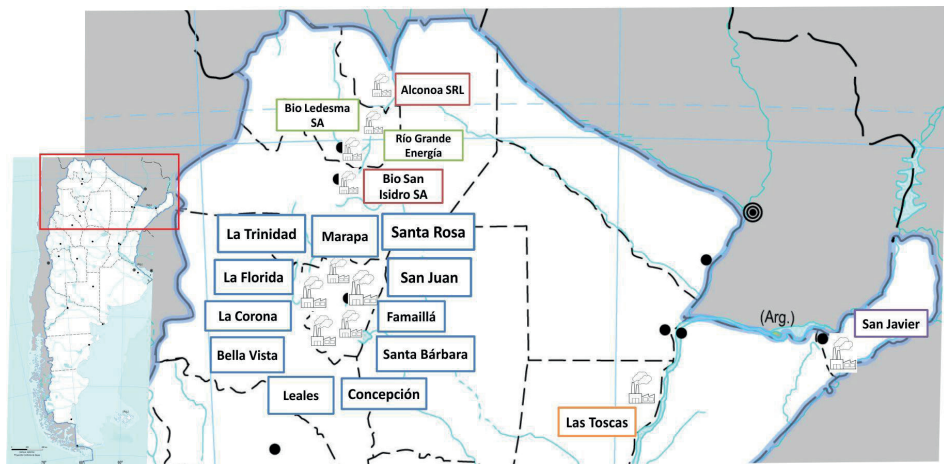


Figura 1. Destilerías de B1G a partir de caña de azúcar en Argentina. Las 11 destilerías con recuadro en azul se localizan en Tucumán, las 2 que tienen recuadro verde en Salta, las 2 que tienen recuadro rojo en Jujuy, aquella con recuadro en naranja en Santa Fé y finalmente la que tiene recuadro violeta en Misiones.

4. Usos energéticos de la caña de azúcar

En Argentina la caña de azúcar no sólo se destaca por ser la segunda materia prima más utilizada para producir B1G, sino también por ofrecer otros posibles usos con fines energéticos. La producción de briquetas de carbón a partir del RAC es una de ellas. Después de la cosecha, quedan aproximadamente 15 tn (peso fresco) / ha de RAC en el campo. Sólo en Tucumán, el suministro bruto de RAC alcanza los 4,1 millones de tn, lo que sugiere que el 50% de RAC podría recolectarse y procesarse posteriormente, dejando *in situ* la otra mitad para la sostenibilidad del suelo. Suponiendo un rendimiento del 15% en el proceso de carbonización, esto significa que sería factible producir 307,954 tn de briquetas de carbón (Ullivarri et al., 2011; Benedetti, 2018).

Un segundo uso energético deriva de la utilización del bagazo, un subproducto de la industria azucarera, para la cogeneración de energía en las calderas de los ingenios azucareros. El exceso de energía producida por la industria azucarera es equivalente a 100 MW y se entrega al sector energético argentino (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2017).

5. Balance energético del sistema productivo

Se ha estimado que casi 7,7 millones de ha podrían ser potencialmente cultivadas con caña de azúcar en Argentina (Anschau y Acevedo, 2013). Esta expansión potencial plantea algunos problemas que deben evaluarse, y la sostenibilidad aparece como uno de los principales. Para abordar las preocupaciones de la sociedad con respecto a la sostenibilidad de la producción y el uso de azúcar y etanol, se calcularon los saldos de emisión de energía y gases de efecto invernadero (GEI) de una industria de caña de azúcar no integrada verticalmente en Tucumán (Acreche y Valeiro, 2013).

Como resultado de esta investigación, se obtuvo un balance energético de la industria de una relación 3.4: 1. Las emisiones de GEI calculadas durante la etapa agrícola fueron 1824 y 2231 kg CO₂eq. ha⁻¹ año⁻¹ para sistemas productivo de niveles tecnológicos bajos y medios a altos (NT M-A), respectivamente. Esto significa que por cada unidad de energía consumida, se obtienen casi tres unidades y media de energía en equivalentes de azúcar y etanol para sistemas NT M-A (considerando el nivel tecnológico de las granjas más representativas). El proceso de molienda emitió 1187 kg CO₂eq. ha⁻¹ año⁻¹. Los factores más importantes que influyeron en estos equilibrios fueron el gas natural consumido por el ingenio azucarero, el gasoil y los fertilizantes nitrogenados utilizados en el campo, y la práctica de la quema de caña de azúcar que representaba más del 20% de las emisiones totales. Vale la pena mencionar que la proporción 3.4: 1 podría aumentarse hasta una relación 7.3: 1 si se usa 100% de bagazo como fuente de energía y el molino solo produce bioetanol y no azúcar. Además, varias otras situaciones intermedias también podrían mejorar el índice de eficiencia actual (Acreche y Valeiro, 2013).

6. Alternativas bioenergéticas sustentables

6.1. Alcohol de segunda generación

En el contexto actual de preocupación ambiental por el reemplazo de combustibles no renovables, se está incursionando alrededor del mundo, en varias formas de producción de energía. Una de ellas, es el aprovechamiento de los residuos resultantes de la actividad agrícola e industrial en cada sitio particular. En este sentido, durante el procesamiento de la caña de azúcar para la producción de azúcar o B1G se obtiene un subproducto denominado bagazo, el cual, en conjunto con el RAC pueden servir como materias primas lignocelulósicas para la producción de bioetanol de segunda generación (B2G).

El bagazo, particularmente, ha sido considerado como un sustrato altamente promisorio para este fin debido a que se encuentra disponible en grandes cantidades sin la necesidad de cultivar tierras adicionales cuyo uso pueda competir con el suministro de alimentos (Masarin et al., 2011). Además, presenta ventajas sustanciales para la industria tales como su disponibilidad en el sitio de utilización y la posibilidad de compartir parte de la infraestructura utilizada para la producción de B1G (Dias et al., 2012).

En la actualidad, Argentina no cuenta con plantas de procesamiento de material lignocelulósico para producir B2G (Acevedo et al., 2017). Sin embargo, en el marco conceptual de una biorrefinería, la producción de este biocombustible podría complementar la producción de azúcar y B1G.

Con el objetivo de potenciar el rendimiento de la biomasa de la caña de azúcar con fines energéticos, entre los cuales se encuentra la producción de B2G, la utilización de cultivares con alto contenido de fibra denominados *caña energía*, representa otra alternativa favorable. Estudios demostraron que, a pesar de la disminución del 37% en el contenido de sólidos solubles (brix) en relación a los cultivares comerciales, estos cultivares, alcanzaron una producción de materia seca total (brix+fibra) un 13% superior (Samuels et al., 1984). En la Tabla 1 pueden observarse los principales componentes del tallo de cultivares de caña de azúcar de tipo comercial y de caña energía, evaluados por nuestro grupo de trabajo en Argentina.

Tabla 1. Valores porcentuales de brix, fibra y humedad en tallos de cultivares comerciales de caña de azúcar y de caña energía en edad soca 1 (campaña 2018/2019). Famaiyllá (S 27°03', O 65°25', 363 msnm), Tucumán, Argentina.

Genotipo	Tipo de cultivar	Brix (%)	Fibra (%)	Humedad (%)
L 91-281	Comercial	17,7	11,5	70,8
NA 78-724	Comercial	18,5	14,0	67,5
LCP 85-384	Comercial	17,17	11,2	71,2
HOCP 92-665	Comercial	17,2	13,3	69,5
NA 56-30	Comercial	17,7	12,3	70,0
INTA 05-3116	Caña energía	13,5	22,9	63,6
INTA 05-3118	Caña energía	12,8	24,8	62,4

La caña energética cumple con varios de los requerimientos para ser considerada como cultivo energético. En primer lugar, posee una alta productividad de materia seca por área y, considerando la cadena productiva en su totalidad, su balance energético es muy favorable al considerar la cantidad de energía obtenida por cada unidad invertida en el proceso. En segundo lugar, la materia prima, se encuentra disponible durante un período prolongado, dado que el contenido de fibra no posee una fluctuación importante a lo largo del crecimiento, lo cual la convierte en una alternativa económica a largo plazo (Matsuoka et al., 2014). Finalmente, el incremento del contenido de fibra provee de importantes ventajas a estos cultivares, entre las cuales se encuentran el aumento de la vigorosidad y la rusticidad, el cual resulta en un incremento en la resistencia a numerosos factores de estrés, derivando en beneficios tanto económicos como ambientales. En este sentido, su mejor adaptación a regiones marginales evitaría la competencia por el uso de la tierra para la producción de alimentos y, su baja demanda de uso de fertilizantes y pesticidas, resultaría en un menor impacto ambiental (Carvalho-Netto et al., 2014).

Principales componentes de la pared celular

La pared celular secundaria del tallo de la caña de azúcar está compuesta por 38–43 % de celulosa, organizadas en microfibrillas, 25-32 % de hemicelulosa, 17-24 % de lignina y 1.6-7.5 % de extractivos (Masarin et al., 2011). Otros autores reportaron valores de 48.6 % de celulosa, 31.1 % de hemicelulosa 19.1 % de lignina y 1.2 % de cenizas (Sanjuan et al., 2011). La celulosa, que proporciona la rigidez y el soporte a las células vegetales, está inmersa en una matriz de hemicelulosa que está unida covalentemente con lignina, formando una estructura de gran resistencia. La lignina es un complejo heteropolímero que está compuesto por tres alcoholes: cumaril, coniferil y sinapyl (Llerena et al., 2019). A su vez, posee un poder calorífico superior al de los polisacáridos, por lo cual se obtiene más energía cuando se quema (Wang et al., 2014).

En el proceso de producción de B2G, uno de los principales obstáculos es la recalcitrancia de la lignocelulosa que dificulta una actividad eficiente de las enzimas hidrolíticas que conduce a una reducción de las tasas de sacarificación. Como consecuencia, se necesitan pretratamientos costosos para mejorar la tasa de sacarificación de biomasa, lo cual resulta en una sustancial disminución de la rentabilidad de este proceso (Vanholme et al., 2010). En las últimas décadas, en el mundo, se han evaluado distintos métodos de pretratamiento a escala de laboratorio, planta piloto e industrial. Estos pueden clasificarse en métodos físicos, químicos, físico-químicos y biológicos, y presentan diferentes niveles de eficiencia. Algunos de los pretratamientos evaluados para su utilización en el bagazo de caña de azúcar son hidrotermal (físico), oxidativo (químicos), explosión de vapor (físico/químicos) y enzimático (biológico) (Kumar et al., 2019).

El contenido de lignina se considera una de las principales causas de la recalcitrancia de la biomasa (Siqueira et al., 2011), motivo por el cual diversos estudios han evaluado la posibilidad de reducir el contenido de lignina en el tallo de la caña de azúcar empleando el mejoramiento convencional (Baffa et al., 2014, García et al., 2019) o mediante la desregulación de genes vinculados a la síntesis de lignina (Bewg et al., 2016).

Recientemente en Argentina, nuestro equipo de investigación utilizó el bagazo de un cruzamiento comercial de caña de azúcar para determinar el contenido de celulosa,

hemicelulosa y lignina detergente ácido (LDA) a partir de la fibra detergente neutra (Van Soest, 1973) (Figura 2) y el contenido de lignina por espectroscopia de bromuro de acetilo (EBA) (Fukushima y Hatfield, 2001) (Figura 3). Como resultado, se identificaron genotipos con digestibilidad de biomasa mejorada (alto contenido de celulosa y bajo contenido de lignina) pero, debido a que los valores de LDA y EBA no mostraron correlación, se pudieron seleccionar diferentes genotipos de acuerdo con el método de determinación de lignina considerado. Estas divergencias sugieren que se necesitan realizar análisis complementarios para validar estas metodologías como herramientas de selección de cultivares de caña para bioenergía, por ejemplo, estudios de sacarificación. En este mismo estudio, como resultado de análisis de correlación realizados con los principales polímeros de la pared celular y rasgos agronómicos, se observó que el bagazo de genotipos con mayor peso de tallo está asociado a un mayor contenido de celulosa y un menor contenido de LDA (García et al., 2019).

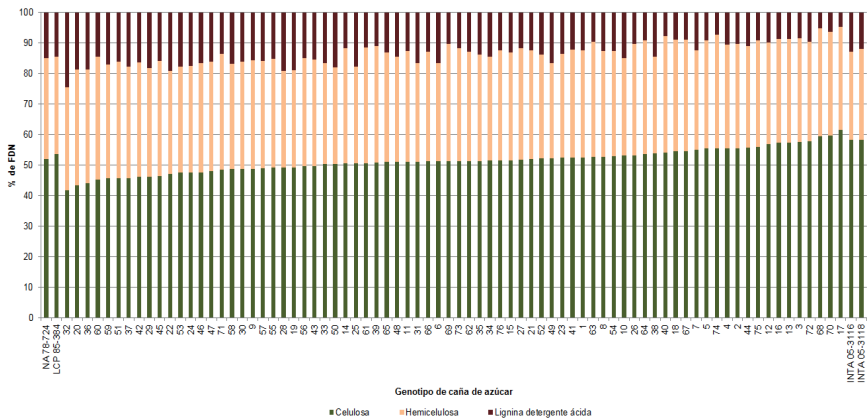


Figura 2. Composición química de la fibra detergente neutra (FDN) del bagazo de 84 progenies del cruzamiento de caña de azúcar NA 78-724 x LCP 85-384, incluidos los progenitores, y dos genotipos promisorios de caña energía INTA 05-3116 e INTA 05-3118.

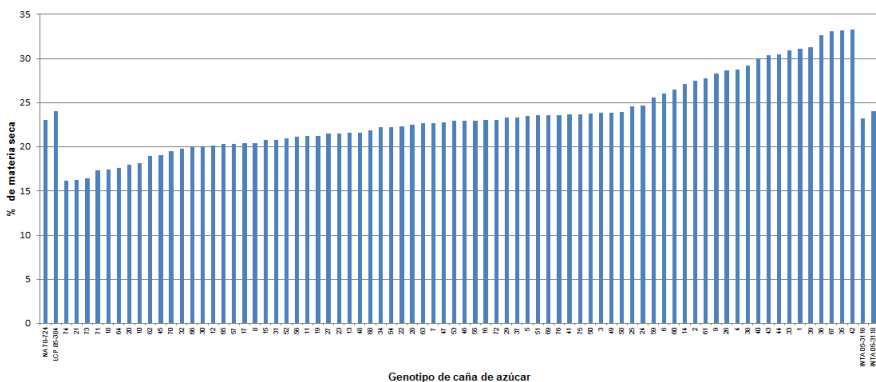


Figura 3. Lignina determinada por espectroscopia de bromuro de acetilo en el bagazo de 84 progenies del cruzamiento de caña de azúcar NA 78-724 x LCP 85-384, incluidos los progenitores, y dos genotipos promisorios de caña energía INTA 05-3116 e INTA 05-3118.

Análisis estructural de la pared celular

Gran parte del contenido de energía de la caña se encuentra almacenado en los componentes de la pared celular de entrenudos y hojas. Para poder extraerlos de manera eficiente, es necesario conocer las interacciones entre ellos. Sin embargo, la arquitectura general de los tejidos que son sustrato de las enzimas capaces de hidrolizar biomasa para producir energía, no han sido estudiados en profundidad (Souza et al., 2013). Recientemente, Llerena y colaboradores (2019) compararon haces vasculares de la corteza y de la porción central de entrenudos de *S. officinarum*, *S. barberi*, *S. spontaneum* y *S. robustum*, cuatro de las cinco especies fundadoras de los híbridos modernos utilizados a campo en Argentina. Este grupo observó una deposición de fibra alrededor de los haces aún en estadios tempranos de crecimiento. A su vez, vieron que la única especie que no contaba con las células del parénquima lignificadas fue *S. officinarum*.

Nuestro grupo está trabajando en la comparación de dos cultivares contrastantes, uno comercial de caña de azúcar y otro de caña energía. El objetivo de esta investigación es evaluar como es el patrón de los componentes principales de la pared celular de ambos genotipos. En la Figura 4 se muestra en detalle un haz vascular de la región central del entrenudo de un tallo teñido con floroglucinol ácido para la detección de lignina. A su vez, se encuentran identificados xilema, floema, y el tejido de sostén que recubre el haz.

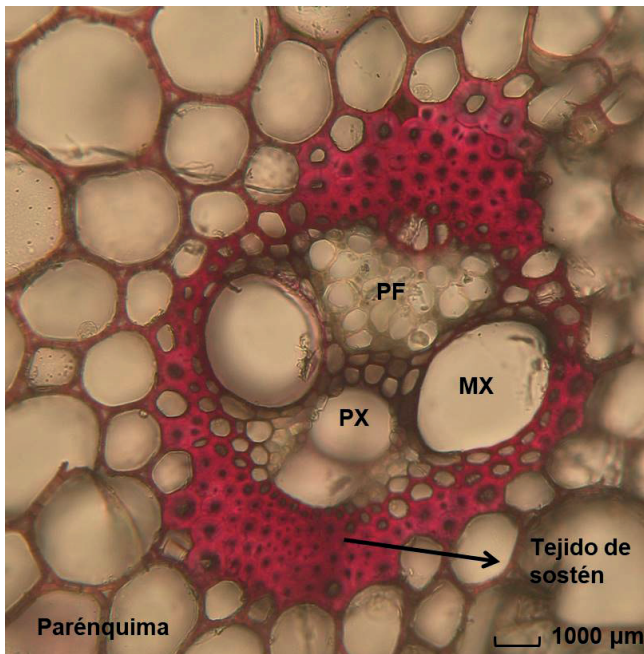


Figura 4. Detalle de un haz vascular de la región central del entrenudo de un tallo usando floroglucinol ácido para la detección de lignina (color rojo). PF= protofloema, MX=metaxilema, PX= protoxilema. La barra indica un aumento de 1000 μm.

El estudio abarcó un *análisis espacial* para el cual se analizaron distintos entrenudos con diferente grado de desarrollo de una misma planta (en la presente publicación se muestran resultados de un solo entrenudo) y un *análisis temporal*, ya que estos fueron evaluados en distintas etapas del cultivo. Se realizaron cortes transversales de los entrenudos para observar, de manera diferencial la deposición de lignina alrededor de los haces vasculares de la región central. La siguiente figura muestra una selección de imágenes, obtenidas con un microscopio óptico, del primer entrenudo del tallo (contando desde la superficie del suelo), en las etapas macollaje, período de gran crecimiento e inicio de madurez.

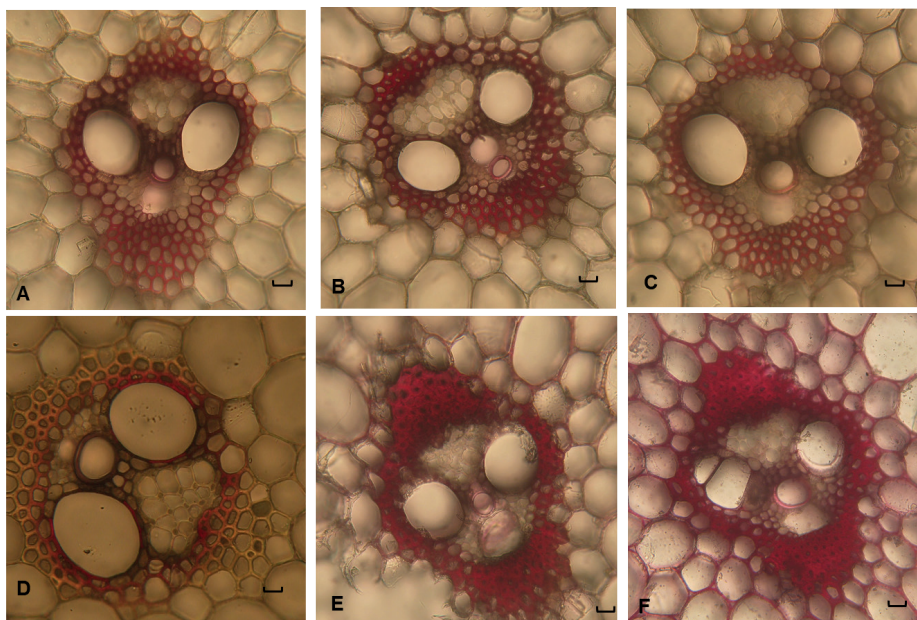


Figura 5. Sección transversal de la porción central del primer entrenudo (contando desde el suelo), de cultivares de caña de azúcar teñidos con floroglucinol ácido para la detección de lignina (color rojo).

Cultivar comercial *LCP 85-384* en macollaje (A), gran crecimiento (B) e inicio de madurez (C).
Genotipo de caña energía *INTA 05-3116* en macollaje (D), gran crecimiento (E) e inicio de madurez (F).
La barra indica un aumento de 1000 μm .

Como resultados preliminares, la tinción del tejido de sostén de los haces vasculares en la etapa de macollaje de ambos genotipos de caña de azúcar sugiere una deposición temprana de lignina en la pared celular (Figuras 5. A y D). Además, se observó una mayor tinción en los tejidos del genotipo de caña energía *INTA 05-3116* (Figuras 5. D, E y F), respecto del cultivar comercial *LCP 85-384* (Figures 5. A, B y C), debido a que presentó tinción no sólo el tejido de sostén que recubre los haces, si no también, en las paredes celulares de las células parenquimáticas. El estudio está actualmente en curso, por lo cual, este análisis resulta una primera aproximación a los resultados finales. Próximamente, se espera contar con determinaciones químicas de composición de pared celular de los entrenudos evaluados para contrastar con las imágenes obtenidas por microscopía.

6.2. Producción de energía a partir de vinaza

La vinaza es un subproducto orgánico resultante de la producción de etanol que se caracteriza por su alto contenido de potasio, calcio, magnesio, azufre y nitrógeno y con un pH entre 3.5 y 5. Por cada litro de etanol 96% elaborado, se obtienen entre 10 y 15 litros de vinaza, lo cual, considerando solamente la cantidad producida de este combustible en la provincia de Tucumán, suma un volumen de 2.800.000 a 4.200.000 m³ de vinaza (Ortiz, 2018). En los últimos años se han empleado diversas prácticas de manejo, con el fin de evitar el derrame de este subproducto en los cursos de agua provocando su contaminación, entre las cuales se encuentran la ferti-irrigación, el compostaje y el riego en tierras de sacrificio.

Recientemente, dos alternativas para el uso de la vinaza con el propósito de producir energía eléctrica fueron evaluadas por Ortiz (2018) para la provincia de Tucumán: su concentración y combustión y la producción de biogás mediante el uso de reactores. La implementación de estas propuestas podría proporcionar una alternativa a la problemática ambiental antes expuesta e incrementar el rendimiento energético del cultivo de caña de azúcar.

Concentración y combustión

El proceso de generación de energía eléctrica consiste en la concentración de vinaza hasta los 60° brix para ser quemada posteriormente junto con bagazo en las calderas de los ingenios. Como resultante de este proceso, además de generarse gases de combustión, se obtienen cenizas de potasio que pueden ser utilizadas en la elaboración de fertilizantes.

Se estimó para la provincia de Tucumán, una producción potencial de 342 GWh con el empleo de esta alternativa y, considerando el aprovechamiento de cenizas ricas en potasio, se calculó un ingreso bruto mixto de 49.000.000 US\$/año.

Actualmente la empresa GENNEIA está instalando una planta para la concentración y combustión de la vinaza en la provincia de Tucumán en convenio con la Compañía Azucarera Los Balcanes. Con una inversión de U\$60.000.000, el primer emprendimiento de este tipo en Argentina, proyecta la producción de 22 MW, de los cuales 19 MW serán inyectados al Sistema Interconectado Nacional (Mirande, 2019).

Biogás

Se obtiene a partir del ingreso de la vinaza cruda a un biorreactor, a partir del cual se generan, además de biogás, CO₂ y vinaza tratada. Este sistema presenta desventajas, tales como la obtención de un volumen de vinaza similar al ingresado y los altos niveles de DQO (demanda química de oxígeno) aún presentes en la vinaza tratada que impiden su eliminación en cursos de aguas. Para esta alternativa, se estimó una producción potencial de 69.000.000 m³ CH₄/año para la provincia de Tucumán, que es capaz de generar 282 GWh mediante motores de combustión interna, resultando en un ingreso bruto de 43.000.000 US\$/año.

7. Consideraciones finales

La caña de azúcar posee notables atributos que la sitúan como uno de los cultivos energéticos de mayor importancia en el mundo, entre los cuales se destacan su alta producción de biomasa y el balance energético altamente positivo de su ciclo de producción.

Asimismo, el desarrollo de cultivares de caña energía de alto contenido de biomasa y adaptación a regiones marginales, son una alternativa promisoría para contribuir a la sustitución del uso de combustibles fósiles evitando la competencia por el uso del suelo para la alimentación humana. El aprovechamiento de los residuos agrícolas para la generación de energías sostenibles da lugar a la transformación del sistema productivo actual a un escenario de economía circular en el cual los residuos se convierten, nuevamente en recursos, para volver a ser utilizados en la cadena productiva.

En Argentina, la caña de azúcar se destaca como cultivo energético por su participación en casi la mitad del etanol producido en el país y el uso del bagazo para la cogeneración de energía eléctrica. El empleo de nuevas tecnologías, tales como la producción de B2G a partir de bagazo o RAC y el uso de la vinaza para la cogeneración de energía eléctrica, pueden complementar los actuales usos. En este sentido, estudios sobre la composición química de la biomasa y la distribución de componentes en la pared celular (principalmente la lignina), pueden proveer información valiosa para el futuro desarrollo de cultivares y tecnologías que faciliten el uso adecuado de la lignocelulosa del tallo. Asimismo, la utilización de los establecimientos existentes posibilita la amortización del capital instalado, ya que podrían funcionar plantas híbridas de producción de B2G como complemento de las de B1G. De esta forma, se estaría avanzando en la disminución del uso de combustibles fósiles y la valorización los residuos generados en el proceso productivo.

Bibliografía

- Acevedo, A., Tejedor, M.T., Erazzú, L.E., Cabada S., Sopena R. (2017) Pedigree predicts the potential industrial value of sugarcane cultivars. *Euphytica*, 213:121. <https://doi.org/10.1007/s10681-017-1908-2>
- Acreche, M.M., Valeiro, A.H. (2013) Greenhouse gasses emissions and energy balances of a non-vertically integrated sugar and ethanol supply chain: A case study in Argentina. *Energy*; 54:146-154. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.12.046>
- Anschau, R.A., Acevedo, A. (2013) Agrofuels and water in Argentina. En: *Bioenergy and Water* p. 77-88, Editores: Dallemand, J.F., Gerbeens, P.E.
- Baffa, D.C.F, Costa, P.M.A, Silveira, G., Lopes, F.J.F, Barbosa, M.H.P, Loureiro, M.E., Cruz, C.D., Peternelli, L.A. (2014) Path analysis for selection of saccharification-efficient sugarcane genotypes through agronomic traits. *Agronomy Journal*, 106: 1643–1650. <https://doi.org/10.2134/agronj13.0576>
- Benedetti, P. (2018) *Primer relevamiento del cultivo de caña de azúcar de la República Argentina a partir de imágenes satelitales para la campaña 2018*. E.E.A I.N.T.A. Famaillá. Disponible: <https://inta.gob.ar/documentos/primer-relevamiento-del-cultivo-de-cana-de-azucar-de-la-republica-argentina-a-partir-de-imagenes-satelitales-para-la-campana-2018> (Último acceso: 20 de Nov de 2019).
- Bewg, W.P., Poovaiah, C., Lan, W., Ralph, J., Coleman, H.D. (2016) R.N.Ai downregulation of three key lignin genes in sugarcane improves glucose release without reduction in sugar production. *Biotechnol Biofuels*, 9: 270. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0683-y>

- B.N.D.E.S (2008) *Bioetanol de Caña de azúcar: Energía para el desarrollo sostenible*. Río de Janeiro, Brasil. B.N.D.E.S y C.G.E.E.
- Wang, J., Nayak, S., Koch, K., Ming, R. (2014) Carbon partitioning in sugarcane (*Saccharum* species) En: Research progress and challenges in optimising biomass quality and yield. Bosch, M., Hazen, S.P. (Ed). <https://doi.org/10.3389/978-2-88919-214-4>
- Carvalho-Netto, O., Bressiani, J., Soriano, H., Fiori, C., Santos, J., Barbosa, G., Xavier, M., Landell, M., Pereira, G. (2014) The potential of the energy cane as the main biomass crop for the cellulosic industry. *Chem Biol Technol Agric* 1: 1–8. <https://doi.org/10.1186/s40538-014-0020-2>
- Dias, M.O.S, Junqueira, T.L., Cavalett, O., Cunha, M.P., Jesus, C.D.F, Rossell, C.E.V, Maciel, Filho R, Bonomi, A. (2012) Integrated versus stand-alone second-generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. *Bioresource Technology*, 103: 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.120>
- F.A.O (2017) Food and Agriculture Data. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#home> (Último acceso: 8 de Jun de 2019).
- Fukushima, R.S., Hatfield, R.D. (2001) Extraction and isolation of lignin for utilization as a standard to determine lignin concentration using the acetyl bromide spectrophotometric method. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49: 3133–3139. <https://doi.org/10.1021/jf010449r>
- García, J.M., Acevedo, A., Silva, M.P., Gomez, L., Erazzú, L.E. (2019) Cell-wall chemical-composition analysis of a *Saccharum* spp. progeny for increased bagasse digestibility. En: *Reports and Abstracts of the Proceedings of the XXX International Society of Sugar Cane Technologists Congress* p. 661–664. Editor: Peter G. Allsopp. I.S.B.N.: 978-616-92761-0-4.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (2017) *Centro de Investigación en Ciencias Políticas, Económicas y Sociales*. Informe de productos agropecuarios regionales.
- Kumar, B., Bhardwaj, N., Agrawal, K., Chaturvedi, V., Verma, P. (2019) Current perspective on pretreatment technologies using lignocellulosic biomass: An emerging biorefinery concept. *Fuel Processing Technology*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106244>
- Llerena, J.P.P, Figueiredo, R., Brito, M.S., Kiyota, E., Mayer, J.L.S., Araujo, P., Mazzafera, P. (2019) Deposition of lignin in four species of *Saccharum*. *Scientific Reports*, 9(1), 1–19. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42350-3>
- Masarin, F., Gurpilhares, D.B., Bafa, D.C.F., Barbosa, M.H.P., Carvalho, W., Ferraz, A., Milagres, A.M.F. (2011) Chemical composition and enzymatic digestibility of sugarcane clones selected for varied lignin content. *Biotechnol Biofuels*, 4: 55. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-4-55>
- Matsuoka, S., Kennedy, A.J., Gustavo, E., Santos, D., Tomazela, A.L., Rubio, L.C.S. (2014) Energy Cane: Its Concept, Development, Characteristic and Prospects. *Advances in Botany*, 2014, 597275. <https://doi.org/10.1155/2014/597275>
- Ministerio de Hacienda. Secretaría de Política Económica. Informes de cadenas de valor - Azucarera. (2018) – Año 3 - N° 3. Disponible en: https://www.economia.gob.ar/peconomica/docs/S.S.P.M.icro_Cadenas_de_valor_Azucar.pdf (Último acceso: 20 de Nov de 2019).

- Mirande, J.C. (2019) Production of bioethanol and electric power at La Florida sugarcane mill. 2019 Brasil-U.K. Workshop: "Sustainable Chemicals and Fuels through Synthetic Biology". C.T.B.E./C.N.P.E.M, Campinas, São Paulo, Brasil, 27 al 30 de mayo.
- Ortiz, J.M. (2018) *Producción de energía a partir de vinaza en Tucumán: análisis de las diferentes alternativas*. Repositorio I.T.B.A. Disponible en: <https://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/1407> (Último acceso: 25 de Nov de 2019).
- Romero, E.R., Digonzelli, P.A., Scandaliaris, J. (2009) La caña de azúcar: características y ecofisiología. En: *Manual del cañero* p. 13-22. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Editores: Romero, E., Digonzelli, P.A., Scandaliaris, J. I.S.B.N. 978-987-21283-7-1.
- Samuels, G., Alexander, A.G., Rios, C., Garcia, M. (1984) The production of energy cane in Puerto Rico: the Hatillo project. *J. Am. Soc. Sugarcane Technol.*, 3:14–17.
- Sanjuan, R., Anzaldo, J., Vargas, J., Turrado, J., Patt, R. (2011) Morphological and chemical composition of pith and fibers from Mexican sugarcane bagasse. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 59: 447–450. <https://doi.org/10.1007/s001070100236>
- Secretaría de Gobierno de Energía (2019) Producción y Ventas de Bioetanol. Disponible en <http://datos.minem.gob.ar/dataset/estadisticas-de-biodiesel-y-bioetanol>
- Siqueira, G., Milagres, A.M.F, Carvalho, W., Koch, G., Ferraz, A. (2011) Topochemical distribution of lignin and hydroxycinnamic acids in sugarcane cell walls and its correlation with the enzymatic hydrolysis of polysaccharides. *Biotechnology for Biofuels*, 4: 7. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-4-7>
- Souza, A.P., Leite, D.C.C, Pattathil, S., Hahn, M.G., Buckeridge, M.S. (2013) Composition and Structure of Sugarcane Cell Wall Polysaccharides: Implications for Second-Generation Bioethanol Production. *Bioenergy Research*, 6(2), 564–579. <https://doi.org/10.1007/s12155-012-9268-1>
- Tew, T.L., Cobill, R.M. (2008) Genetic improvement of sugarcane (*Saccharum* spp.) as an energy crop. En: *Genetic improvement of bioenergy crops* p. 249–272. Springer, New York
- Ullivarri, E.F., Vallejo, J.I., Valeiro, A.H. Briquetas de carbón elaboradas con residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar. *Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales*, Año I, Nº 1, 2011. p. 71-72. I.S.S.N. 1853-7677. Disponible en: <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-revista-ciencia-y-tecnologa-de-los-cultivos-indu.pdf> (Último acceso: 20 de Nov de 2019)
- U.S.D.A. G.A.I.N. report (2019) Argentina Sugar Annual 2019. Disponible en: https://gain.fas.usda.gov/Recent%20G.A.I.N.%20Publications/Sugar%20Annual_Buenos%20Aires_Argentina_4-18-2019.pdf (Último acceso: 25 de Nov de 2019)
- Vanholme, R., Demedts, B., Morreel, K., Ralph, J., Boerjan, W. (2010) Lignin biosynthesis and structure. *Plant Physiology*, 153: 895–905. <https://doi.org/10.1104/pp.110.155119>
- Van Soest P.J. (1973) Collaborative study of acid detergent fibre and lignin. *Journal - Association of Official Analytical Chemists*, 56: 781–784. <https://doi.org/10.1093/jaoac/56.4.781>

Biomassa de vegetais não lenhosos e resíduos orgânicos para geração de energia no Brasil e estado de São Paulo

**Carolina dos Santos Batista Bonini¹, Marlene Cristina Alves²,
Silvio Crestana³, Bruno Rafael de Almeida Moreira¹,
Gabriela Lozano Oliverio¹, Ricardo Antonio Ferreira Rodrigues^{2*}**

¹Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas. Universidade Estadual Paulista (UNESP). Rod. Cmte João Ribeiro de Barros, km 651, Bairro das Antas. CEP:17900-000, Dracena, São Paulo, Brasil.

²Faculdade de Engenharia. Universidade Estadual Paulista (UNESP). Av. Brasil, 56. CEP: 15.385-000, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.

³Embrapa Instrumentação. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Rua XV de Novembro, nº 1.452, Centro, Caixa Postal 741. CEP: 13560-970, São Carlos, São Paulo, Brasil.

*Autor para correspondência: ricardo.rodrigues@unesp.br

1. Aspectos gerais sobre biomassa para a geração de energia

A biomassa agrícola, como fonte de biocombustíveis, tem assumido importância crescente na obtenção de energia. É evidente a necessidade de uma progressiva substituição do modelo econômico atual, assentado nos combustíveis fósseis, por outro que privilegie a utilização de biomassa. A Comunidade Europeia já reconhecera esta tendência ao publicar a Diretiva 30/2003, que estabelece que os “estados-membros deverão assegurar que seja colocado nos seus mercados uma proporção mínima de biocombustíveis e de outros combustíveis renováveis”. Salienta-se a importância do respeito pelas boas práticas agrícolas e tecnológicas na produção e utilização de biomassa (Agroportal, 2019).

A bioenergia pode ajudar na mitigação das mudanças climáticas globais contribuindo para diminuir a queima de carvão, petróleo e gás natural para geração de energia e, conseqüentemente, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera. Pesquisadores brasileiros e estrangeiros têm estudado o assunto e defendem ser possível expandir o uso de bioenergia sem degradar o solo, comprometer a segurança alimentar ou os recursos hídricos. O uso da bioenergia, juntamente com a redução do desmatamento de florestas tropicais e o replantio de vegetação nativa para sequestrar e retirar dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera, pode ajudar a limitar

o aquecimento global a 1,5 °C ou bem abaixo de 2 °C nas próximas décadas. Mas há a ressalva que o aumento generalizado e desordenado da produção de bioenergia no mundo pode resultar em uma grande expansão de áreas de cultivo de culturas energéticas em detrimento do cultivo de alimento, além de aumentar o uso de água para irrigação. "Alguns cenários do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) apontam que, com o aumento da demanda por energia, poderia ocorrer um incremento de mais de 25 milhões de hectares por ano da área voltada ao cultivo de culturas para produção de bioenergia no mundo. Isso poderia pressionar áreas de vegetação nativa ou voltadas à produção de alimentos", segundo Luís Gustavo Barioni, pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária (Agência FAPESP, 2019- Elton Alisson).

Nos últimos anos o uso de biomassa para a obtenção de energia é um tema de interesse geral, pelo fato de ser energia renovável e considerada neutra, do ponto de vista ambiental na emissão de CO₂ para a atmosfera (Protocolo de Kyoto, 1997), aumentando a produção de plantas destinadas a este fim. Muitos países têm tomado iniciativas particulares para o aproveitamento deste recurso, não obstante muito da biomassa produzida no meio agrícola e florestal não é utilizada para a produção de bioenergia devido ao fato de existir diversas dificuldades técnicas na sua extração, manipulação e transporte, assim como insuficientes informações sobre a quantidade e qualidade destes recursos.

No entanto, os recursos mundiais de biomassa são enormes, e existem várias técnicas que produzem energia de forma economicamente eficiente em vez das formas não-comerciais utilizadas nos países mais pobres. Estudos recentes mostram que em cenários futuros haverá muitas vantagens em produzir energia da biomassa, principalmente quando as fontes de energia renovável se tornarem competitivas em relação aos combustíveis fósseis, o que se espera que ocorra por volta de 2020 (Genovese et al., 2006).

Os produtos e resíduos da atividade agrícola e florestal (cereais, forragens, produtos amiláceos, oleaginosas, produtos fibrosos e lenhosos, entre outros) são convertidos por diversos processos (fermentação, gasificação, combustão) em: combustíveis, tais como etanol, biodiesel, hidrogênio; energia elétrica e calorífica; e uma vasta gama de materiais, como plásticos, adesivos, tintas, detergentes, produtos farmacêuticos, algodão e linho.

Os materiais de biomassa com potencial de alta energia incluem: resíduos agrícolas como: palha, bagaço de cana-de-açúcar, casca de café, casca de arroz, entre outros; resíduos da floresta tais como lascas de madeira, serragem e casca. Resíduos de atividades florestais contam com 65 % do potencial energético da biomassa enquanto 33 % vêm a partir de resíduos de culturas agrícolas (Werther et al., 2000).

As energias renováveis estão se tornando de suma importância nos últimos anos, devido às oscilações no preço do petróleo; à crescente preocupação com as mudanças climáticas; o avanço das tecnologias, tornando a conversão energética mais eficiente e a grande disponibilidade de matéria prima, entre outros fatores. Neste contexto, ressalta-se a conversão da biomassa residual como fonte energética. Dentro das energias renováveis encontra-se a biomassa, a qual está sendo considerada uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos, tanto no

mercado internacional quanto interno. O Brasil, por ser um país de dimensões continentais, clima tropical e com tradição agrícola, se destaca na produção de biomassa residual oriunda de resíduos de culturas agrícolas para geração de energia. Entretanto, para uma adequada utilização dessas matérias primas, a escolha de biomassas energeticamente eficientes, e de uma melhor metodologia de conversão, se faz necessária na caracterização dos resíduos (biomassa), bem como a melhor forma de sua utilização e os impactos ambientais. Ou seja, esta caracterização será determinante na escolha da biomassa e da tecnologia a ser aplicada à mesma (Moers et al., 2011).

O aproveitamento da biomassa pode ser feito por meio de diversas formas, desde combustão direta (com ou sem processos físicos de secagem, classificação, compressão, corte/quebra, entre outros), processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou de processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação). De maneira geral, os energéticos podem ser considerados como primário, quando correspondem a materiais ou produtos obtidos diretamente da natureza, por exemplo, a lenha e a cana-de-açúcar, ou secundários, como são os combustíveis resultantes de processos de conversão dos combustíveis energéticos primários. Nesta classe está o carvão vegetal produzido a partir da madeira e o álcool produzido a partir de substâncias fermentáveis (Nogueira e Lora, 2003), citado pelo IEE, USP (2018).

Conforme o Balanço Energético Nacional, BEN (1982) e adaptação do CENBIO (Centro Nacional de Referência em Biomassa), as fontes de biomassa foram separadas em três principais grupos: Vegetais não lenhosos; Vegetais lenhosos; e Resíduos Orgânicos (Figura 1), que além de apresentar as principais fontes, apresenta também os principais processos de conversão da biomassa em energéticos (IEE, 2018).

Os países com o cultivo agrícola ativo e em grandes dimensões cultiváveis são os maiores fornecedores de matérias primas para a produção de bioenergia. Estes, segundo o relato do estudo sobre o tema inserido no Plano Nacional de Energia 2030, a melhor região do planeta para a produção da biomassa é a faixa tropical e subtropical, entre o Trópico de Câncer e o Trópico de Capricórnio. A faixa tropical e subtropical do planeta abrange alguns países das Américas Central e do Sul, como o Brasil. Além da grande quantidade de terra agriculturável, nosso país apresenta solo e condições climáticas adequadas (BCSD Portugal, 2007).

Na história da humanidade, o uso de madeira proveniente de florestas foi o grande responsável pelo desmatamento das áreas vegetais do planeta, incluindo-se aí a Europa e os Estados Unidos. Mesmo no Brasil, a diminuição da Mata Atlântica e de parte da Floresta Amazônica é consequência do desmatamento indiscriminado, em grande parte para utilização da madeira como fonte de energia de forma não sustentável. Por este motivo, durante muito tempo, a biomassa foi vista de forma pejorativa, como sendo um combustível para ser usado apenas por países subdesenvolvidos. Entretanto, as crises do petróleo da década de 1970 tiveram papel significativo para alterar esta visão, pois o uso da biomassa como fonte de energia passou a ser encarado como uma opção alternativa em substituição aos derivados de petróleo.

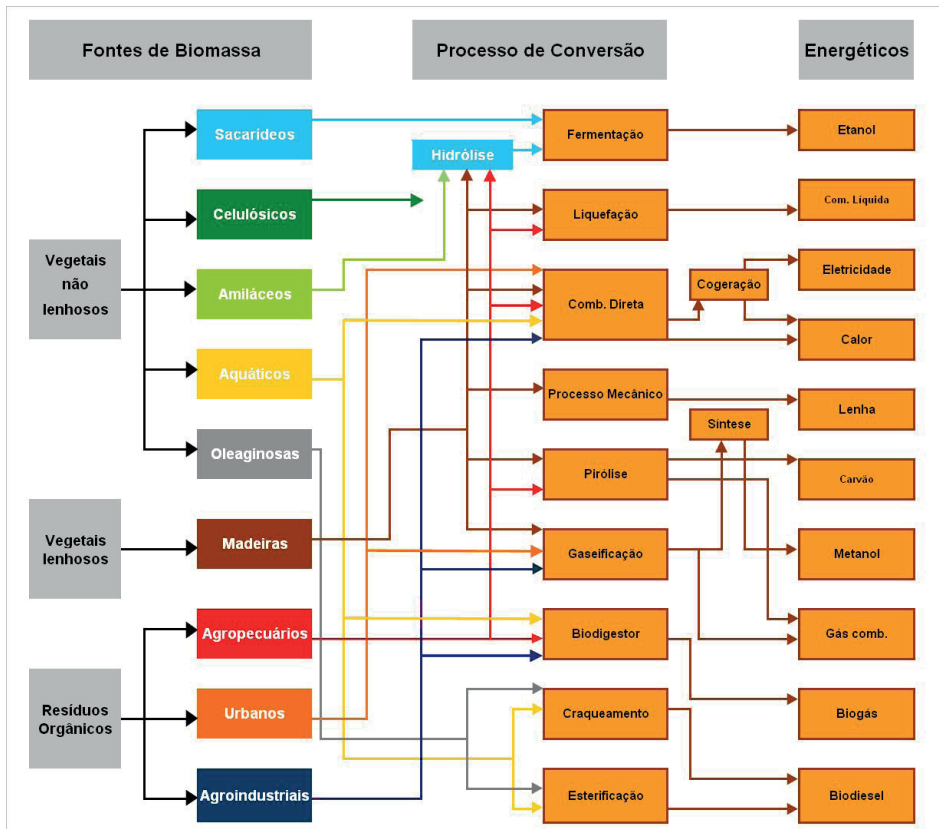


Figura 1. Fluxograma das fontes de biomassa, processos de conversão e energéticos produzidos. Fonte: Instituto de Energia e Ambiente (IEE), USP. *Balço Energético Nacional - BEN. Brasília: MME, 1982 (adaptado por CENBIO).*

2. Biomassa para geração de energia no Brasil e estado de São Paulo

Os estudos relacionados à temática sobre as energias renováveis estão se tornando de suma importância nos últimos anos, devido às oscilações no preço do petróleo; à crescente preocupação com as mudanças climáticas; o avanço das tecnologias, tornando a conversão energética mais eficiente e a grande disponibilidade de matéria prima, entre outros fatores. Portanto, o estabelecimento de indicadores para avaliação da qualidade e quantidade da biomassa produtiva, o potencial das diferentes regiões do Brasil, o impacto no solo e gestão ambiental são fundamentais na busca de soluções para o sucesso dos objetivos almejados na geração de energia.

Em função da necessidade mundial pela busca de fontes limpas e alternativas, no Brasil não é diferente: à medida que o país foi se modernizando, o setor energético brasileiro

foi se desenvolvendo. As principais fontes de energia do Brasil, atualmente, são: energia hidroelétrica, petróleo, carvão mineral e os biocombustíveis, além de algumas outras utilizadas em menor escala, como gás natural e a energia nuclear. Os biocombustíveis são fontes de energia recentemente implantadas no país, caracterizados por serem do tipo renovável. São originados de produtos vegetais (como a mamona, a cana-de-açúcar, entre outros). Seu uso é amplamente defendido, pois se trata de uma energia mais limpa e que, portanto, acarreta em menos danos para o meio ambiente. Por outro lado, os críticos apontam que muitas áreas naturais são devastadas para o cultivo das matérias-primas necessárias para essa fonte de energia. Os biocombustíveis mais utilizados no país são: o Etanol (álcool), o Biogás e o Biodiesel (Pena, 2019).

Da energia que movimenta o mundo 85% são de origem fóssil e 80% dessa energia tem seu domínio concentrado em cerca de 10 países. A contribuição do Brasil na emissão de gás carbônico para a atmosfera é de 0,41%, enquanto que a dos EUA, China, Alemanha, Rússia e Japão, somam 65%. Esse contexto foca a difusão da utilização de biomassa como opção estratégica e social para o planejamento energético do país. Aproximadamente 11% da energia produzida no mundo têm como origem a biomassa. Em países em desenvolvimento ela é a principal fonte de energia, contribuindo com 35% do total. Em países pobres a contribuição da biomassa chega a mais de 90% das fontes de energia, a maior parte em forma não comercial. Isso mostra que muitas vezes a biomassa é considerada uma fonte de energia do passado, pois quando um país é industrializado ela fica relegada a segundo plano (Grimoni et al., 2004).

No Brasil 42,9% da energia gerada provém de fontes renováveis e 57,1% de não renováveis (Figura 2). Na geração de bioenergia o Brasil se destaca na produção de etanol, a partir de cana-de-açúcar, assim como na de biodiesel. O Brasil produziu um recorde de 33,1 bilhões de litros de etanol na safra 2018/19 (CONAB, 2019).



Figura 2. Repartição da oferta interna de energia no Brasil.
Fonte: Ben (2018).

No Brasil, as alternativas para a produção de óleos vegetais são diversas, o que constitui num dos muitos diferenciais para a estruturação do programa de produção e uso do

biodiesel no país. Por se tratar de um país tropical, com dimensões continentais, o desafio colocado é o do aproveitamento das potencialidades regionais. Isso é válido tanto para culturas já tradicionais, como a soja, o amendoim, o girassol, a mamona e o dendê, quanto para alternativas novas, como o pinhão manso, o nabo forrageiro, o pequi, o buriti, a macaúba e uma grande variedade de oleaginosas a serem exploradas. Entretanto, embora algumas plantas nativas apresentem bons resultados em laboratórios, como o pequi, o buriti e a macaúba, sua produção é extrativista e não há plantios comerciais que permitam avaliar com precisão as suas potencialidades. Dentre as várias alternativas, merecem destaque a soja, cujo óleo representa 90% da produção brasileira de óleos vegetais, o dendê, o coco e o girassol, pelo rendimento em óleo, e a mamona, pela resistência à seca. No Tabela 1 são apresentadas algumas características de culturas oleaginosas com potencial de uso para fins energéticos (Gevonese et al., 2006).

Tabela 1. Matérias-Primas para a produção de Biodiesel. (Gevonese et al., 2006).

Espécie	Origem do Óleo	Porcentagem de óleo (%)	Meses de Colheita	Rendimento em Óleo (t/ha)
Dendê	Amêndoa	22	12	3,0-6,0
Babaçu	Amêndoa	66	12	0,1-0,3
Girassol	Grão	38-48	3	0,5-1,9
Colza	Grão	40-48	3	0,5-0,9
Mamona	Grão	45-50	3	0,5-0,9
Amendoim	Grão	40-43	3	0,6-0,8
Soja	Grão	18	3	0,1-0,2

No estado de São Paulo há potencial para geração de bioenergia advinda de resíduos da agricultura, agroindústria, silvicultura, resíduos sólidos urbanos, dejetos animais e esgoto. São Paulo tem potência instalada de 5,7 gigawatts de biomassa de cana-de-açúcar (Ottoboni, 2018), portanto, estando nessa fonte a principal geradora de bioenergia.

Os resíduos orgânicos originados das atividades agropecuárias, da região urbana e da agroindústria também são fontes potenciais para a geração de bioenergia. Pode-se destacar os resíduos de culturas agrícolas e de seu beneficiamento ou as palhas, cascas de frutos, cereais, os bagaços, os resíduos das podas de pomares e vinhas, rejeitos madeireiros, entre outros (Saiter, 2008).

Mapas gerados pelo Research Centre for Gas Innovation-RCGI (2019) estimam o potencial de produção de biogás e biometano no Estado de São Paulo e o potencial elétrico a partir do biogás, por município, de acordo com três grandes fontes de obtenção do gás: resíduos de criação animal, resíduos urbanos e setor sucroalcooleiro. Os dados mostram que o potencial de energia elétrica gerada anualmente a partir de biogás em São Paulo é de 36.197 gigawatt-hora (GWh), o que corresponde a 93% do consumo residencial paulista. O potencial anual de biometano poderia exceder em 3,87 bilhões de Nm³ o volume anual de gás natural comercializado ou substituir 72% do diesel comercializado.

“O setor sucroalcooleiro é o que apresenta o maior potencial de aproveitamento de biogás (Figura 3). Em 10 municípios com maior concentração de resíduos, o potencial de biogás é de mais de 3 bilhões Nm³ na safra. Se fossem transformados em biometano, isso corresponderia a 65% do consumo de gás natural no Estado. Ou 32 mil GWh, se fossem aproveitados na geração de eletricidade com biogás” (Coelho, 2019). A Figura 3 ilustra o potencial de geração de Biogás e de Biometano no Estado de São Paulo. Salienta-se o grande potencial do setor sucroalcooleiro.

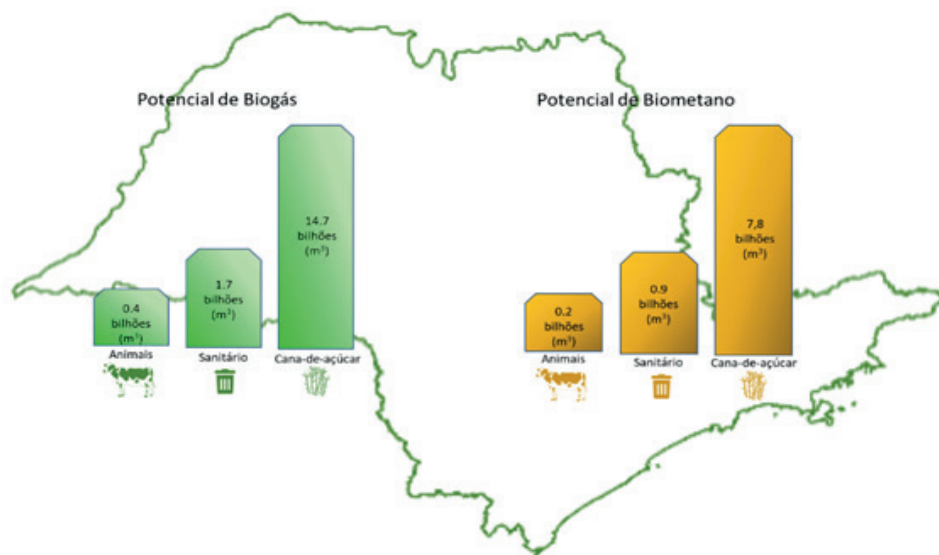


Figura 3. Potencial de geração de Biogás e Biometano no Estado de São Paulo. Fonte: RCGI (2019).

O biogás é o gás proveniente do processo anaeróbio de decomposição da matéria orgânica. Em um aterro sanitário, por exemplo, o gás emitido devido à decomposição do lixo ali depositado é o biogás. Ele é composto, em média, de 60% de metano, 35% CO₂ e 5% de outros gases. O biogás tem três utilizações básicas: para geração local de energia elétrica (via sua combustão em um motogerador ou em uma microturbina) e energia térmica ou, ele pode ser purificado (para remoção de boa parte do CO₂), e transformado em biometano. O biometano tem as mesmas utilizações do biogás, com a vantagem de poder ser transportado para uso mais distante, além de servir também como biocombustível de veículos leves, médios ou pesados. Hoje, o país deixa de gerar 115 mil gigawatts-hora de energia com o não aproveitamento dos rejeitos urbanos, da pecuária e da agroindústria. Esse volume poderia ter abastecido quase 25% de toda energia elétrica consumida em 2015, aliviando a pressão sobre o setor. Outra equivalência energética é que o biometano - extraído da purificação do biogás - poderia chegar a uma produção anual de 28,5 bilhões m³. Isso equivale a 50% do consumo de diesel do país e poderia alimentar quase 25% da frota nacional

de veículos, combinando a gestão adequada dos diversos resíduos com emissão negativa de dióxido de carbono. Aos poucos, o cenário começa a mudar: de 2015 para 2016, o biogás cresceu 30% na matriz elétrica brasileira e foi inaugurada a maior termelétrica a biogás da América Latina, instalada no aterro sanitário de Caieiras, em São Paulo (Abiogás, 2019).

3. Potencial de geração de energia por meio de biomassa de vegetais não lenhosos e resíduos orgânicos no Brasil e estado de São Paulo

3.1. Introdução

O Brasil país é o maior produtor mundial, com 646 milhões de toneladas colhidas na safra de 2017/2018, e as usinas do país têm rendimento elevado, fabricando açúcar e etanol em larga escala e recorrendo à queima de resíduos de cana para gerar eletricidade, com desempenho singular no campo da agroindústria (UDOP, 2019). Hoje, o Brasil é responsável por cerca de 33% do etanol produzido mundial e pode desempenhar um papel importante na satisfação de futuras demandas de etanol. Essa característica é peculiar do Brasil, não sendo possível repetir em outros países essa produção de culturas energéticas, sem prejudicar a produção de alimentos (Leite et al., 2009).

A energia gerada a partir de biomassa do bagaço de cana-de-açúcar poderia abastecer mais da metade dos consumidores do Estado de São Paulo, com seus 45 milhões de habitantes (SNA, 2019). De acordo com a COGEN (Associação da Indústria de Cogeração de Energia), a capacidade instalada para esse tipo de energia é de 10,8 gigawatts (GW). Já a UNICA (União da Indústria de Cana-de-açúcar) estima que o Brasil possui potencial para implementar adicionalmente cerca de 20 GW de cogeração de biomassa da cana-de-açúcar. Tal potencial engloba apenas as áreas já plantadas de cana-de-açúcar no Brasil.

Hoje, no Brasil, a principal biomassa advém da cana-de-açúcar e de cada tonelada do produto, 250 kg são de bagaço e outros 204 kg de palha e pontas que podem ser aproveitadas para geração de energia elétrica. Podemos apontar as principais vantagens como: criar confiabilidade e segurança energética para os grandes centros consumidores (Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste); evitar perdas de até 12% do sistema de transmissão; o ciclo de produção da biomassa da cana-de-açúcar auxilia na captura de carbono da atmosfera; é uma energia renovável; possibilita a produção de biogás proveniente da biodigestão da vinhaça; oferece mais um produto para o setor sucroenergético, promovendo sua maior competitividade; e é altamente disponível e com potencial de ser incrementado com a utilização da palha por meio da colheita mecanizada. Como desvantagens: menor poder calorífico, maior possibilidade de geração de material particulado para a atmosfera, o que significa maior custo de investimento para a caldeira e os equipamentos para remoção de material particulado e dificuldades no estoque e armazenamento.

O parque sucroalcooleiro brasileiro é composto por aproximadamente 350 usinas, sendo que destas, 152 localizam-se no estado de São Paulo, com maior concentração na região oeste do estado e com perspectivas de abertura de 30 novas usinas/destilarias nessa região (UDOP, 2019), com alto potencial de produção de energia por meio da biomassa advinda da cana-de-açúcar. Dantas (2009) menciona que metade das usinas do Brasil, estão localizadas no estado de São Paulo e corresponde a 63% da produção de açúcar e 61% do etanol brasileiro. Com essa produção, a produção de biomassa também é alta, com

estimativas de que apenas as usinas do interior de São Paulo poderiam gerar eletricidade suficiente para suprir a demanda dos estados do Rio de Janeiro, Paraná e Santa Catarina (Salomão, 2009).

Frasson et al. (2009) relatam que há exemplos de usinas que já vêm negociando esses créditos de carbono a partir da cogeração. A Central de Álcool Lucélia, situada no interior de São Paulo, por meio de sua subsidiária Bioenergia do Brasil, fechou contrato com o Japão para negociar créditos de carbono a preços atraentes. A Organização Balbo, com duas usinas de açúcar e álcool em funcionamento no interior de São Paulo, negocia créditos de carbono para o Japão com ágio, uma vez que a matéria-prima cana-de-açúcar é orgânica, e considerada um diferencial no mercado.

Esse Mercado só tem a crescer, segundo MME (2019) o ministério do meio ambiente fez um levantamento do aumento da produção da biomassa de cana nos próximos anos, até 2030, e do total, o quanto de bagaço e o quanto de palha poderão ser produzidos. Na Tabela 2 pode-se verificar resultados de um estudo mais detalhado com a estimativa de quanto de biomassa poderá ser utilizado. Pode-se observar que há uma tendência da utilização do bagaço e da palha na produção de energia, com isso poderá ocorrer um aumento considerável da oferta de energia elétrica por parte das usinas sucroalcooleiras.

Com o incremento da palha de cana-de-açúcar como matéria-prima, a eletricidade produzida a partir da biomassa, que em 2016 foi responsável por 8% da eletricidade total gerada no Brasil, pode aumentar cerca de 6%, segundo a Empresa Brasileira de Pesquisas Energéticas (EPE) (MME, 2017). O uso da palha de cana-de-açúcar como matéria-prima poderia incrementar essa quantidade em cerca de 6%. A eletricidade produzida a partir da biomassa, atualmente, é responsável por 8% da eletricidade total gerada no Brasil, que foi de 620 TWh em 2016, segundo a Empresa Brasileira de Pesquisas Energéticas (EPE). O uso da palha de cana-de-açúcar como matéria-prima poderia incrementar essa quantidade em cerca de 6%.

A seguir, na Tabela 2 estão apresentadas as diferentes matérias que podem ser utilizadas para uso de biomassa na produção de energia no noroeste do estado de São Paulo.

Tabela 2. Estimativa da oferta da biomassa de cana-de-açúcar até o ano de 2030 (em milhões de toneladas) (MME, (2019).

Descrição	2005	2010	2020	2030
Produção de cana				
Total	431	515	849	1140
Biomassa produzida				
Total	117,8	141,9	233,5	313,5
Bagaço seco	57,8	69,7	114,6	153,9
Palha seca	60,0	72,2	118,9	159,6
Biomassa ofertada				
Total	57,8	73,3	132,3	185,8
Uso do bagaço	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Recuperação da palha	0,0%	5,0%	14,9%	20,0%
Destinação da biomassa				
Produção de etanol	0	0,3	17,7	18,7
Produção de eletricidade	57,8	73,0	114,6	167,1

Biomassa vegetal

A partir da Revolução Industrial, fato cataclísmico ao desenvolvimento socioeconômico-demográfico federativo, a demanda global de energia primária progride, vertiginosamente: urbanização e superpopulação, fenômenos correlatos, são inegociáveis agentes propulsores. Petróleo, gás natural e carvão mineral são, desde então, as principais fontes energéticas de origem fóssil empregadas à questionável produção de bens e serviços. Relevantíssimos à ordem de economias emancipadas e emergentes, derivados de indústria petroquímica são, todavia, axiomáticos à sustentabilidade do planeta Terra: crises de mercado internacional de petróleo afetam, irrevogavelmente, dinâmica de relações, acordos e transações comerciais; há, complementarmente, possibilidade de inflação de preços de combustíveis correlatos e alimentos, desvalorização de moedas, e repudiáveis conflitos de interesse, em relação à monopolização de reservas naturais georreferenciadas a regiões de instabilidade político-religiosa. O ritmo de exploração de petróleo é, abismalmente, superior à taxa de reposição natural. À extinção de jazidas, prospectam-se, otimismo: cinquenta a sessenta anos. Matrizes energéticas dependentes de fontes insustentáveis estariam, contextualmente, fadadas ao insucesso. Diversificá-las, reestruturando-as, gradativamente, seria, portanto, emergencial. Em 2040, especificamente, ofertar-se-ão, aproximadamente, 105,7 quadrilhões de BTU, acrônimo de *British thermal unit*. Em 2050, recursos sustentáveis, incluindo-se biomassa vegetal, consolidar-se-ão, finalmente, à produção mundial de bioeletricidade, estima, entusiasmadamente, a Agência Internacional de Energia (Bajwa et al., 2018; Cancela et al., 2019; Fernandez-Anez et al., 2018; Garcia et al., 2019; Glushkov et al., 2019; Iftikhar et al., 2019; Saqib et al., 2018).

Produto fotossintético, a biomassa vegetal é, elementarmente, estruturada por celulose, hemicelulose, lignina, extrativos orgânicos e minerais, minoritários. A celulose, homopolissacarídeo linear, amorfo ou cristalino, particularmente, constitui-se de monômeros de glicose, interconectados por pontes glicosídicas e hidrogenadas, e forças de van de Waals. A hemicelulose, heteropolímero ramificado, é, dinamicamente, polimerizada por arabinose, galactose, manose, xilose e, ou, ácido glicurônico; conceitua-se holocelulose, o padrão organizacional hemicelulósico-glicólico. A lignina, molécula polifenólica, é, tridimensionalmente, consolidada por unidades repetitivas de fenilpropano, composto aromático importantíssimo à permeabilidade, coesão e, automaticamente, resistência físico-mecânica, rendimento energético e estabilidade oxidativa de matéria-prima, integral ou residual (Tabela 3). Celulose e hemicelulose, polímeros de natureza reativa endotérmica, superficialmente, distinguidos por comprimento e densidade de ramificações de cadeia carbônica, e resiliência química, são sensíveis à termodegradação, comparados à lignina, cuja relação O/C e comportamento exotérmico, condicionado à existência de p-cumaril, coniferil e sinapil, álcoois fenilpropionícos, são, tecnicamente, atrativos à produção de bioenergia (Chen et al., 2015; Fan et al., 2019; Fengel e Wegener, 2011).

A produção primária anual global de biomassa vegetal é, aproximadamente, 220 bilhões de toneladas, equivalentes a 4500 EJ de energia solar. Estados Unidos e Canadá são os principais centros de carvalho e pinus, essências florestais imponentes ao promissor, porém criticado, mercado de biocombustíveis sólidos. Europa, República Popular da China, Federação Russa, Grécia, Turquia e Brasil representariam, ocasionalmente, polos de produção de recursos não-madeireiros, como: arroz, cana-de-açúcar, feijão, milho, noz-moscada,

sementes oleaginosas e soja (Bajwa et al., 2018; Bonassa et al., 2018; Go et al., 2019; Gunukula et al., 2019)

Tabela 3. Propriedades de polímeros de biomassa vegetal (Adaptado de Chen, Peng e Bi, 2015).

Propriedade	Polímero		
	Celulose	Hemicelulose	Lignina
Estrutura	Linear	Ramificada	Tridimensional
Fórmula química	$(C_6H_{10}O_5)_n$, grau de polimerização	$(C_5H_8O_4)_n$	$[C_9H_{10}O_3(OCH_3)_{0,9-1,7}]$
Relação O/C	0,8	0,8	0,3-0,5
Relação H/C	1,7	1,6	1,2-1,5
Monômero(s)	Glicose	Xilose, manose, galactose, arabinose, glicose, ácido glicurônico etc.	p-cumaril, coniferil e sinapil
Temperatura de decomposição (°C)	315-400	220-315	160-900
Comportamento térmico	Endotérmico	Endotérmico	Exotérmico

3.2. Resíduos de biomassa de vegetal não lenhosos

Virtuoso à produção e exportação de *commodities*, o Brasil, economia de proporções continentais, destaca-se, todavia, negativamente, em relação à geométrica e polêmica geração de resíduos agrícolas: bagaço e palha de cana-de-açúcar, folhas, hastes e vagens de soja, casca de arroz, caule e sabugo de milho, e farelo de trigo são recorrentes em agroecossistemas sulinos, sudoestinos, centro-oestinos, nordestinos e nortinos (Tabela 4); apesar de problemáticos à sustentabilidade de agricultura, estes oferecem apreciáveis oportunidades de negócios, inclusive: geração de biocombustíveis de qualidade superior.

A casca de arroz, majoritariamente, composta por lignocelulose, sílica, resinas, óleos essenciais e extrativos orgânicos, corresponde ao principal resíduo rizicultural. Concentrado em silicatos, o material é imprevisível à indústria alimentícia, porém, versatilíssimo à produção de energia térmica e bioeletricidade via combustão direta (Banerjee et al., 2013; Dagnino et al., 2013; Jeong et al., 2016; Portugal-Pereira et al., 2015)

Bagaço e palha de cana, particularmente, possibilitam fabricação de bioetanol de segunda geração, biometano, bio-óleo pirolítico e gás de síntese ou *syngas*, e cogeração de vapor e eletricidade, tecnologia consolidada. A ineficiência industrial de setor sucroenergético gera, aproximadamente, 270 kg de bagaço por tonelada de material processado; cinzas residuais de caldeira, torta de filtro e vinhaça complementariam a finita lista de subprodutos interessantes a biorrefinarias, destilarias, siderúrgicas e empreendimentos agropecuários (Alves et al., 2015; Brenelli et al., 2016; Gonçalves et al., 2016; Hernández-Pérez et al., 2016; Lopes Silva et al., 2014; Neves et al., 2016; Rodríguez, 2016; Rueda-Ordóñez et al., 2016; Santos et al., 2016; Sheikhdavoodi et al., 2015).

Casca, farelo de grãos imprestáveis à comercialização, folhas e sabugo são os principais resíduos de cultura de milho. Co-digestão anaeróbica, combustão, peletização e

briquetagem são rotas termoquímicas e técnicas de densificação capazes de convertê-los em biogás, álcool benzílico e biocombustíveis sólidos (Castello et al., 2014; Finney et al., 2009; Foo, 2016; Fu et al., 2009; Luna et al., 2014; Molino et al., 2016; Owamah et al., 2015; Rashad, 2016; Reza et al., 2014; Wang et al., 2015; Wongsiriamnuay et al., 2015).

Composição química de resíduos não lenhosos

A análise composicional de biomassa vegetal é, advertidamente, imprescindível à produção sustentável de biocombustíveis. (Álvarez et al., 2018; Chandra et al., 2012; Pattanaik et al., 2019). Resíduos agrícolas, enfatizando-se porções não comestíveis de culturas de arroz, cana-de-açúcar, milho, trigo e soja, são, unanimemente, compostos por lignocelulose, proteínas e cinzas (Tabela 5).

Tabela 4. Geração de resíduos por culturas agrícolas cultivadas em território brasileiro (IBGE, 2007).

Região	Área plantada (ha)	Área colhida (ha)	Produção total (t)	Resíduos (t)
Arroz				
Sul	1.151.160	1.145.022	6.515.432	1.303.086
Sudeste	72.145	71.495	294.092	58.818
Centro-Oeste	437.409	434.989	1.164.863	232.972
Nordeste	741.675	732.277	1.024.557	204.911
Norte	465.535	460.760	1.029.456	205.891
Cana-de-açúcar				
Sul	717.191	715.698	49.554.465	14.866.339
Sudeste	6.685.058	6.667.584	481.227.697	144.383.309
Centro-Oeste	1.806.738	1.798.610	132.490.492	39.747.147
Nordeste	1.200.286	1.192.919	69.272.542	20.781.762
Norte	62.896	62.756	4.560.528	1.368.158
Milho				
Sul	4.850.976	4.808.867	24.020.568	13.931.929
Sudeste	2.333.031	2.318.636	10.102.250	5.859.305
Centro-Oeste	3.387.938	3.381.193	13.522.338	7.842.956
Nordeste	2.955.844	2.779.043	3.130.962	1.812.273
Norte	536.482	533.125	1.070.078	620.645
Soja				
Sul	8.283.922	8.282.999	22.917.251	16.729.593
Sudeste	1.411.032	1.410.282	3.842.890	2.805.309
Centro-Oeste	9.014.957	9.014.157	26.201.365	19.126.996
Nordeste	1.455.734	1.452.880	3.909.240	2.853.745
Norte	455.075	454.281	1.167.287	852.119
Trigo				
Sul	1.680.633	1.679.868	3.853.557	2.312.134
Sudeste	55.739	55.739	149.970	89.982
Centro-Oeste	45.796	45.727	104.088	62.452
Brasil	49.807.252	49.498.907	861.175.968	298.051.832

Tabela 5. Composição química de resíduos de biomassa vegetal não lenhosos.

Biomassa	Polímero			Referência
	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	
Linter de semente de algodão	80-95	5-20	0	Chandra, Takeuchi e Hasegawa (2012)
Palha de aveia	39,4	27,1	20,7	Chandra, Takeuchi e Hasegawa (2012)
Gramíneas	25-40	35-50	10-30	Chandra, Takeuchi e Hasegawa (2012)
Folhas	15-20	80-85	0	Chandra, Takeuchi e Hasegawa (2012)
Casca de noz-moscada	25-30	25-30	30-40	Chandra, Takeuchi e Hasegawa (2012)
Palha de trigo	30-39,2	26,1-50	15-21,1	Kaparaju et al. (2009)
Palhada de milho	37,5	30	10,3	Li, Kim e Nghiem (2010)
Palha de arroz	44,3	35,5	20,4	Chen et al. (2011)
Palha de milho	42,6	21,3	10-20	Saha e Cotta (2006)
Bagaço de cana	45	20	30	Stanmore (2010)
Resíduos de abacaxi	19,4	22,4	4,7	Ban-Koffi e Han (1990)
Bagaço de cana	26-50	25-28	23-25	Guo et al. (2009) e Pandey, Soccol e Mitchell (2000)
Casca de coco	44,2	12,1	32,8	Khalil, Alwani e Omar (2006)
Casca de semente de soja	29-51	10-20	1-4	Corredor et al. (2006) e Mielenz (2001)
Casca de arroz	35,1	20,9	17,6	Nordin, Said e Ismail (2007)
Resíduos de bananeira	31,9	18	22,4	Bilba, Arsene e Ouensanga (2007)

Relações poliméricas são elementos-chave à convicção produção de bioenergia. Normalmente, resíduos de alto teor de lignina precedem biocombustíveis sólidos íntegros, mecanicamente, resistentes à abrasão e tensão de cisalhamento, e, energeticamente, competitivos ao carvão mineral (Chen et al., 2015; Fan et al., 2019)

Abundantes, regulares, acessíveis e preventivos à mobilização de núcleos florestais para fins energéticos, matérias-primas residuais agrícolas são, entretanto, menos calóricas, comparadas a madeiras de carvalho e pinus. Ordenadamente: palhada de milho, forrageiras, bagaço de cana e hastes de algodoeiro possibilitam notáveis valores de densidade energética, despontando-se, portanto, à fabricação de biocombustíveis sólidos, líquidos e gasosos e, extraordinariamente, adsorventes de CO₂, tecnologia projetada à mitigação de gases de efeito estufa (Tabela 6).

Biocombustíveis de resíduos não lenhosos

Sucintamente, define-se biocombustível, o combustível de biomassa derivado de rotas termoquímicas e biológicas, orientados à substituição, parcial ou total, de recursos de origem fóssil. Tecnicamente, há possibilidade de classificá-los, ponderando-se, principalmente, natureza físico-química e finalidade econômica de material de origem. Biocombustíveis de primeira geração são, geralmente, produzidos por culturas agrícolas amiláceas, oleaginosas e sacarinas, como arroz, cana-de-açúcar, girassol, milho, trigo

e soja; em relação à segunda geração, trabalham-se materiais inespecíficos à agricultura de alimentos, evitando-se, portanto, eventuais conflitos setoriais: óleos vegetais não-comestíveis e fração orgânica de resíduos sólidos urbanos representariam a classe, verticalizada à promoção de tecnológicas eficazes à minimização de aquecimento global. Associa-se a terceira geração à exploração de recursos aquáticos, como macro e microalgas, ricas em carboidratos, lipídeos e ácidos graxos ótimos à digestão anaeróbica, fermentação, oxidação, esterificação e transesterificação, particular à tecnologia de biodiesel. Apesar de, relativamente, embrionária, a quarta geração contempla fontes carbono-neutro e negativo, especialmente: cianobactérias (Chandra et al., 2012; Hays et al., 2015; Naik et al., 2010; Scaife et al., 2015; Valdivia et al., 2016).

Tabela 6. Potencial energético relativo de resíduos de biomassa vegetal não lenhoso (Adaptado de Bajwa et al., 2018).

Cultura/ resíduo	Categoria	Propriedade		
		Densidade aparente (kg m ⁻³)	Poder calorífico (MJ kg ⁻¹)	Densidade energética (GJ m ⁻³)
Pinus	Lenhoso	420-670	30,2	12,7-20,3
Carvalho		600-900	19,3	11,6-17,4
Palha de aveia	Não lenhoso	46-136	17,8	0,8-2,4
Palha de canola		24-121	17,4	0,4-2,1
Palha de trigo		34-130	14,4	0,5-1,9
Palhada de milho		460-480	18,1	8,3-8,7
Palha de cevada		30-47	14,7	0,4-0,7
Palha de arroz		50-120	15,2	0,8-1,8
Restos de forrageiras		68-323	17,4	1,2-5,6
Casca de avelã		560	20,2	11,3
Fragmentos de sementes oleaginosas		544	23,2	12,6
Hastes de algodão		150-250	18,1	2,7-4,5
Bagaço de cana	280-320	16,9	4,7-5,4	

Tributários ao desenvolvimento e fortalecimento de socioeconomia rural, fibras de coco, bananeira e bambu, folhas de feijoeiro, mandioca e soja, e hastes de girassol expandiriam a heterogênea seleção de resíduos lignocelulósicos, tecnicamente, aptos à produção de bioenergia em regiões tropicais (Abedi e Dalai, 2017; Azargohar et al., 2019; Bonassa et al., 2018; Djatkov et al., 2018; Eisenbies et al., 2019; Hassan et al., 2019; Pradhan et al., 2018)

3.3. Biomass-to-solid

Briquetes e pellets

A biomassa vegetal *in natura* é, técnica e economicamente, insustentável à produção de bioenergia: heterogeneidade de partículas, considerável teor de água e, invariavelmente, limitado poder calorífico líquido, natureza higroscópica, insatisfatória densidade aparente e factível emissão de gases de efeito estufa por combustão direta são limitações, redutíveis. Densificá-la por briquetagem ou peletização seria, portanto, perspicaz. Em 2016, produziram-se, mundialmente, 26 milhões de toneladas métricas de *pellets*, estratégicos à otimização de logística de transporte e armazenamento de biomassa. Em 2020, o mercado de biocombustíveis sólidos ofertará, aproximadamente, 45 milhões de toneladas métricas de briquetes e *pellets*, que, embora compartilhem princípios de produção, distinguem-se, físico-química, morfológica e energeticamente: os primeiros assumem comprimento e diâmetro de 60–100 e 100–200 mm, enquanto os últimos, 18–24 e 6–8 mm, respectivamente. A Comissão Europeia projeta, otimismo, protagonismo de *pellets*, em relação à Matriz Energética Global. As potências, Estados Unidos, Canadá, Alemanha e Federação Russa, são lideranças em exportação de biocombustíveis sólidos, enquanto Reino Unido, Japão e República da Coreia, recordistas em importação. Nacionalmente, há, de forma oficial, quatorze plantas industriais de *pellets*, com capacidade de produção anual de 500 mil toneladas métricas, que proveem, principalmente, as unidades federativas: São Paulo, Rio Grande do Sul, Minas Gerais e Bahia; aquecimento de domicílios, ginásios poliesportivos, academias, hotéis e hospitais, alimentação de fornos industriais de padarias e pizzarias, e geração de bioeletricidade em siderúrgicas, termoeletricas e indústrias sucroenergéticas são magníficas finalidades lucrativas de *pellets* (Azócar et al., 2019; Bajwa et al., 2018; Bonassa et al., 2018; Eisenbies et al., 2019; Garcia et al., 2019).

Pergaminho de grãos de cafeeiro, bagaços e palhas de cana e sorgo, fibras de bambu, palha de arroz, palhada de milho, folhas e vagens de feijoeiro e soja, hastes de algodão etc. são matérias-primas prescritíveis à manufatura de briquetes e *pellets* (Aragón-Garita et al., 2016; Faria et al., 2016; GIL et al., 2010; Ishii et al., 2014; Moya et al., 2015; PAULA et al., 2011; Protásio et al., 2011; Theerarattananoon et al., 2011). Particularmente, *pellets* de palha de trigo *in natura* e torrificados são opções à produção de calor e eletricidade em estabelecimentos comerciais e indústrias (Tabela 7). O crivo para finalidades residenciais é rigorosíssimo: irritações, cutânea e ocular, cardiopatias e obstrução de vias respiratórias são diagnósticos de consumidores, expostos a N, S e Cl e finos (Azócar et al., 2019; Eisenbies et al., 2019).

As normas europeias, EN 17225-1, EN 17225-6 e CEN/TC 335, austríaca, ONÖRM M17135, suecas, SS 187, 120 e SS 187, 121, norte-americanas, ANSI/ASABE AD17225 e PFI 2010, e ISO 17725 instruem sobre: produção, análise e finalidades de biocombustíveis sólidos. À inexistência de regulamentação nacional à produção experimental, ou comercial, de *pellets* e briquetes, adaptam-se, normalmente, as especificações da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) para carvões mineral, vegetal e ativado.

Tabela 7. Especificações europeias para comercialização de *pellets* de resíduos lignocelulósicos madeireiros e não madeireiros (Adaptado de Agar et al., 2018 e Azócar et al., 2019).

Propriedade	Norma								
	EN 17225-1			EN 17225-6					
Finalidade	Doméstico			Comercial		<i>Pellet</i> de palha de trigo		<i>Pellet</i> referencial	
Categoria	A1	A2	B	A	B	<i>In natura</i>	Torrificado	Serragem de pinus	
Diâmetro (mm)	6	8		6-25	12-25	6,5	6,3	6,1	
Comprimento (mm)	3,15-40	3,15-40		3,15-40	3,15-50	22,1	25,4	16,8	
Teor de água (%)	≤ 10			≤ 12	≥ 15	9,6	7,1	6,3	
Teor de cinzas (%)	0,7	1,2	2	≤ 6	≥ 10	2,6	3,2	0,4	
Durabilidade (%)	≥ 97,5			≤ 96,5	≥ 97,5	≤ 96	97,2	96,2	98,3
Finos (%)	≤ 1			≤ 2	≥ 3	0,3	0,3	0,6	
PCS (MJ kg ⁻¹)	≥ 16,5			≥ 14,5		15,4	16,1	17,2	
ρ (kg m ⁻³)	≥ 600			≥ 600		469	568	710	
N (%)	0,3	0,5	1	≤ 1,5	≥ 2	0,3	0,45	< 0,2	
S (%)	0,04	0,05	0,05	≤ 0,2	≥ 0,3	0,01	0,01	0,07	
Cl (%)	0,02	0,02	0,02	≤ 0,1	≥ 0,3	0,03	0,1	0,1	
As (mg kg ⁻¹)	≤ 1			≤ 1		< 0,5	< 0,5	0,15	
Cd (mg kg ⁻¹)	≤ 0,5			≤ 0,5		< 0,05	< 0,05	< 0,05	
Cr (mg kg ⁻¹)	≤ 10			≤ 50		13,6	3,1	1,25	
Cu (mg kg ⁻¹)	≤ 10			≤ 20		0,7	1,5	1,25	
Pb (mg kg ⁻¹)	≤ 10			≤ 10		< 0,1	0,3	0,1	
Hg (mg kg ⁻¹)	≤ 0,1			≤ 0,1		< 0,025	0,05	< 0,025	
Ni (mg kg ⁻¹)	≤ 10			≤ 10		8,1	3,2	1,6	
Zn (mg kg ⁻¹)	≤ 100			≤ 100		3,5	17,7	4,5	

Biocarvão

Há, interessantemente, possibilidade de otimização de poder calorífico e impermeabilidade hidráulica de biomassa *in natura*, briquetada ou peletizada, convertendo-a em biocarvão de alta concentração de carbono por pirólise, carbonização hidrotérmica e, ou, carbonização hidrotérmica.

A pirólise, caracterizada pela decomposição térmica de material orgânico sob anaerobiose, é tecnologia consolidada à síntese de biocombustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Baixa temperatura e prolongado tempo de residência especificam reação pirolítica lenta, enquanto o posto, rápida: a concentração de gases ocorre a, pelo menos, 700° C, enquanto bio-óleo e biocarvão, alternativas imediatas ao diesel de petróleo e carvão lignito, acumulam-se, intensamente, a 550–600° C. Ao termotratamento de resíduos orgânicos não lenhoso, recomendam-se reatores de leito fluidizado (Goyal et al., 2008; Kirubakaran et al., 2009; Tripathi et al., 2016; Yildiz et al., 2016; Zhang et al., 2013).

Similar à pirólise, a carbonização degrada biomassa, desconsiderando-se O₂ e, ou, injetando-se CO₂ inerte, controladamente; a faixa de temperatura de trabalho é, todavia, inferior: 400–500 °C. O principal objetivo desta rota é o enriquecimento de carbono para fins energéticos. Concluído o processo, obtêm-se, então: biocarvão, líquidos orgânicos e gases

não-condensados (Bilgic et al., 2016; Hays et al., 2015; Lohri et al., 2016; Pohlmann et al., 2014; Yahya et al., 2015).

Alternativa à torrefação convencional, caracterizada pela modesta capacidade de conversão de biomassa em sólidos, líquidos e gases, degradando-se lignocelulose, extrativos orgânicos e materiais voláteis sob atmosfera inerte a 200-300 °C, por 30-180 minutos, a carbonização hidrotérmica é método recém-introduzido à plataforma de pré-tratamentos termoquímicos de resíduos lignocelulósicos não lenhosos e bio-sólidos urbanos, transformando-os, parcialmente, em hidrocarvão energético, coeso e hidrofóbico, e, portanto, competitivo ao carvão mineral (Tabela 8).

Tabela 8. Classificação e produtos de torrefação (Adaptado de Chen et al., 2015).

	Classe		
	Leve	Moderada	Severa
Temperatura (°C)	200-235	235-275	275-300
Consumo			
Hemicelulose	Moderado	Moderado-severo	Severo
Celulose	Leve	Leve-moderado	Moderado-severo
Lignina	Leve	Leve	Leve
Biocombustíveis e subprodutos			
Sólidos	Biocarvão e cinzas		
Líquidos	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , tolueno, benzeno e C _x H _y		
Gasosos	H ₂ O, ácido acético, álcool, aldeídos e cetonas		

Hidrólise, desidratação, descarboxilação, condensação-polimerização e aromatização são reações típicas de carbonização hidrotérmica, frequentemente, executada a 180-260 °C e 4,7 MPa, por 5-240 minutos; temperaturas aquém de limite inferior são prejudiciais ao processo, cuja fração líquida, majoritariamente, composta por água subcrítica, é solvente, condutor térmico, catalisador e, eventualmente, receptor de micro-ondas. A carbonização hidrotérmica assistida por micro-ondas, padrões de irradiação eletromagnética de 0,3-300 GHz, intermediários ao infravermelho e rádio, é promissora à plataforma *waste-to-energy*: eficiência técnica, qualidade, preciso controle de temperatura e limitado consumo de eletricidade são benefícios, enquanto dependência de receptor, limitação. A tecnologia, efetiva ao termotratamento simultâneo de carvão betuminoso, lodo e lignocelulose, capacita-se à otimização de produtividade, estabilidade térmica e hidrofobicidade de hidrocarvão, ascendendo-o, oportunamente, à tecnologia de captura e estoque de CO₂, conferindo-lhe, portanto, dupla aptidão (Asomaning et al., 2018; Azargohar et al., 2019; Chen et al., 2015; Gupta et al., 2015; Saqib et al., 2018; Tapasvi et al., 2015; Tran et al., 2013)

Embora intensifique poder calorífico superior, hidrofobicidade e dureza, concentrando-se C e H, a torrefação assistida por irradiação de micro-ondas é prejudicial à densidade aparente, resistência mecânica e porosidade de biocarvão, devido à desidratação, volatilização e degradação de aglutinantes naturais (Tabela 9).

Tabela 9. Propriedades de pellets de biocarvão de resíduo lignocelulósico agrícola, pré-tratado por torrefação assistida por irradiação de micro-ondas (Adaptado de Abedi e Dalai, 2017 e Nhuchhen et al., 2018).

Propriedade	Pellet	
	<i>In natura</i>	Torrificado
Densidade aparente (kg m ⁻³)	1136	502
Densidade descontraída (kg m ⁻³)	1097	512
Durabilidade (%)	98	60
Dureza (N)	30	12
Poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹)	17	21,8
Absorção de água (%)	20	8,5
Porosidade (%)	1,9	6,7
Materiais voláteis (%)	85,1	26,4
Carbono Fixo (%)	13,6	72,1
Cinzas (%)	0,2	1,5
C (%)	41,2	85,7
H (%)	5	2,4
O (%)	53,6	10,4
N (%)	0,2	0,05
C/O	0,8	8,2
H/O	0,1	0,2

Definitivamente, a tecnologia economiza eletricidade, pois o fluxo de calor de aquecimento é, exclusivamente, polarizado à matéria-prima, ao invés de propagado pelo equipamento de densificação ou torrefação. A irradiação de micro-ondas dispensa, complementarmente, pré-secagem de resíduo agrícola, cujo potencial dielétrico proporciona inegável absorção de eletromagnetismo, convertendo-o em energia térmica (AZARGOHAR et al., 2019; SIRITHEERASAS et al., 2017).

Propriedades físico-químicas de resíduos lignocelulósicos para briquetes, *pellets* e biocarvão

Propriedades físico-químicas de matéria-prima, como granulometria de partícula, teores de água, materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e extrativos orgânicos, qualidade de lignocelulose, relações moleculares de C, H e O, características de densificação – pressão, temperatura e tempo, natureza e concentração de aditivos, caso existam, condicionam rendimento técnico, qualidade e mercadabilidade de briquetes e *pellets*, reconhecidos pelos inexpressivos teores de água e cinzas, notável durabilidade mecânica, invejável resistência abrasiva e elevadíssima densidade energética, além de manuseabilidade, evidentemente (Chen et al., 2009; Drobíková et al., 2016; Guo et al., 2015; Kaliyan et al., 2010; Kashiwaya et al., 2011; Lela et al., 2016; LI et al., 2014; Michelangelli et al., 2014; Sun et al., 2014; Wongsiriamnuay et al., 2015). Circunstancialmente, bagaço e palha de cana, resíduos de alta relação C/N, disponibilizam mais calorias por unidade de massa, comparados à casca de arroz, rica em cinzas, inertes à combustão. O caule de cafeeiro é, extremamente, energético, justamente, devido à inigualável concentração de carbono. Normalmente, os poderes

caloríficos, superior (PCS) e inferior (PCI), correlacionam-se, positivamente, a C e H, e, negativamente, a O. Casca de grão de café e vagens de feijoeiro são materiais ricos em O e e, portanto, limitados em PCS e PCI (Tabela 10).

Tabela 10. Análise descritiva e associações lineares de propriedades de resíduos lignocelulósicos não lenhosos para produção de bioenergia (Adaptado de Paula *et al.*, 2011).

Cultura	Resíduo	Análise														
		Imediata						Química					Elementar			
		MV	CF	Cz	Hol.	Lig.	Ext.	C	H	O	N	S	C/H	C/N	PCS	PCI
(%)																
cal g ⁻¹																
Arroz	Casca	66,4	17,3	16,4	52,6	26,9	4,1	39,1	5,8	54,7	0,3	0,1	6,7	130,3	3812,3	3445,1
Café	Caule	80,4	19,3	1,1	65,9	22,9	10,5	48,6	6,8	44,0	0,5	0,1	7,2	97,0	4554,0	4125,3
	Pergaminho	79,1	19,9	1,5	67,9	23,0	7,6	47,2	6,9	45,1	0,5	0,2	6,8	94,4	4441,7	4017,9
Cana	Bagaço	82,3	17,2	0,8	46,6	20,9	31,8	45,3	6,8	47,1	0,5	0,3	6,7	90,6	4274,5	3855,8
	Palha	78,6	17,5	4,3	65,6	20,8	9,2	44,6	6,6	48,1	0,3	0,4	6,8	148,7	4315,7	3907,2
Feijão	Caule	77,5	18,8	4,6	66,2	21,6	7,6	44,3	6,6	48,1	0,7	0,3	6,7	63,3	4488,7	4080,3
	Vagem	76,6	18,1	6,6	63,2	12,0	18,2	41,8	6,5	50,5	0,9	0,3	6,4	46,4	4218,6	3815,3
Milho	Caule	76,8	20,5	3,4	64,8	20,5	11,3	45,6	6,5	46,8	0,9	0,3	7,0	50,7	4211,9	3808,6
	Folha	78,3	18,4	3,5	66,7	19,3	10,5	45,4	6,8	46,5	0,9	0,3	6,7	50,4	4464,5	4045,8
	Palha	81,7	17,0	1,6	83,3	9,3	5,8	44,8	6,8	47,9	0,3	0,1	6,6	149,3	4443,4	4024,7
	Sabugo	81,3	18,3	1,2	77,2	15,8	5,8	45,5	6,7	47,0	0,5	0,3	6,8	91,0	4615,3	4201,7
Soja	Caule	80,6	18,1	2,3	69,2	21,6	6,9	45,7	6,6	47,0	0,6	0,1	6,9	76,2	4504,2	4095,8
	Vagem	76,6	18,2	7,2	53,8	17,2	21,8	42,5	6,5	49,0	1,6	0,3	6,5	26,6	4028,5	3625,3
	Média	78,2	32,1	4,2	64,8	19,4	11,8	44,6	6,6	47,8	0,7	0,2	6,8	85,8	4336,4	3926,8
	Desvio padrão	4,1	50,1	4,2	9,7	4,8	8,2	2,4	0,3	2,6	0,4	0,1	0,2	39,1	227,0	214,8
Propriedade	Materiais voláteis	1,00	-0,97	-0,97	0,44	-0,43	0,24	0,78	0,92	-0,82	-0,07	0,13	0,21	0,01	0,81	0,79
	Carbono fixo		1,00	-0,20	0,10	0,23	-0,16	0,33	0,32	-0,32	-0,12	-0,32	0,08	0,06	0,14	0,13
	Cinzas			1,00	-0,47	0,31	-0,15	-0,89	-0,95	0,91	0,09	-0,12	-0,36	0,04	-0,85	-0,83
	Holocelulose				1,00	-0,51	-0,68	0,41	0,43	-0,37	-0,30	-0,21	0,16	0,28	0,70	0,70
	Lignina					1,00	-0,13	0,04	-0,34	0,04	-0,20	-0,15	0,54	0,07	-0,22	-0,22
	Extrativos						1,00	-0,06	0,19	-0,05	0,45	0,41	-0,32	-0,41	-0,26	-0,29
	Carbono							1,00	0,85	-0,98	-0,16	-0,06	0,68	0,01	0,82	0,80
	Hidrogênio								1,00	-0,89	0,01	0,16	0,20	-0,08	0,81	0,78
	Oxigênio									1,00	0,01	-0,05	-0,58	0,13	-0,80	-0,78
	Nitrogênio										1,00	0,36	0,35	-0,88	-0,25	-0,27
	Enxofre											1,00	-0,30	-0,34	0,02	0,02
	C/H												1,00	0,19	0,40	0,41
	C/N													1,00 *	-0,01	0,05
	Poder calorífico superior														1,00 *	0,99
	Poder calorífico inferior															1,00

Implícito, o teor de água é crucial ao rendimento térmico e qualidade e combustão. Adicionalmente, propriedades físicas e químicas de água, solvente universal, exercem funções imprescindíveis à adequada formação de briquetes e *pellets*: pontes de hidrogênio e forças de van der Waals são mecanismos de aglutinação de partículas de limitado raio de ação. Excesso de água reduz, drasticamente, poder calorífico inferior de reação de oxidação de biomassa, devido à entalpia requerida à latência. Materiais, inadequadamente, hidratados oneram custos de processos industriais e limitam vida útil de queimadores, peletizadoras e briquetadoras. Costumemente, matérias-primas de alto teor de carbono fixo queimam, progressivamente, e, portanto, exigem prolongado tempo de residência à plena combustão, comprometendo-a. Materiais voláteis, referentes a gases não-condensáveis, representam a maior parte de biomassa; as propriedades, volatilidade e ignibilidade, correlacionam-se, positivamente. Cinzas são compostas por óxidos e silicatos. O ilimitado depósito de cinzas em chapas de aço-carbono causa corrosão em equipamentos de densificação e conversão termoquímica, além de inflacionar demanda de eletricidade por indução de resistência à transferência de calor; sabores desagradáveis de alimentos preparados em fornos a bicombustível sólido e exagerada emissão de poluentes seriam desvantagens complementares. As análises-padrão, imediata, química e elementar, são protocolos frequentes em pesquisas de bioprospecção de resíduos agrícolas pra produção de biocombustíveis sólidos Adotá-las à prática de caracterização de candidatos à briquetagem e peletização seria, portanto, indispensável à cautelosa seleção de fontes de ótima qualidade físico-química (Cardozo et al., 2019; Gilvari et al., 2019; Lubwama et al., 2017; Mendoza Martinez et al., 2019; Protásio et al., 2011).

3.4. Biomass-to-liquid

Bioetanol de segunda geração

Propulsor de motores automotivos, o bioetanol de primeira geração é, essencialmente, produzido por industrialização de culturas de cana-de-açúcar e milho: Estados Unidos, Brasil e República Popular da China são referências mundiais em processos fermentativos e hidrólise enzimática, indispensável à biorrefinaria celulósica. Quimicamente, semelhante à gasolina, derivado de indústria petroquímica, o bioetanol permite misturas. Elevado número de cetanos, ótimos limites críticos de pontos de fulgor e vaporização e alta taxa de compressão, associados à potente capacidade de mitigação de emissões de gases de efeito estufa e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, procedentes de combustão parcial de recursos fósseis, representariam vantagens imediatas de bioetanol à natureza, sociedade e economia. Apesar de riscos tecnológicos e oneroso capital de investimento, o mercado mundial de bioetanol celulósico disponibilizará, em 2024, 1700 milhões de litros, aproximadamente (Balat et al., 2009; Demirbas, 2008; Nigam et al., 2011; Valdivia et al., 2016). Palhada de milho, farelo de canola, bagaço e palha de cana, cascas de olerícolas e biomassa residual de cultivo de microalgas são realidades à produção de bioetanol de segunda geração (Tabela 11).

Tabela 11. Rendimiento de bioetanol de segunda geração de resíduos não lenhosos.

Resíduo	Pré-tratamento	Microrganismo(s)	Rendimento	Referências
Palha de arroz	-	-	0,172 g g ⁻¹	Wi et al. (2013)
Fibra e casca de côco	Peróxido de hidrogênio e hidróxido de sódio	<i>Zymomonas mobilis</i> , <i>Pichia stipites</i> e <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	79,3-89,2%	Gonçalves et al. (2014)
Palha de cevada	Metóxido de sódio e peróxido de hidrogênio	-	207 mg g ⁻¹	Sheikh et al. (2015)
Palha de trigo micodecomposta	Álcali	<i>Irpex lacteus</i>	117%	García-Torreiro et al. (2016)
Biomassa residual de microalgas	-	-	0,2 g g ⁻¹	Sanchez-Rizza et al. (2017)

Pré-tratamento de lignocelulose, hidrólise enzimática, fermentação e destilação são etapas protocolares à biotransformação de monômeros de glicose e xilose em álcool, intermediada por cepas de *Saccharomyces cerevisiae*, *Clostridium* sp., *Pseudomonas* sp., ou *Zymomonas mobilis* (Ragauskas et al., 2014; Ramos et al., 2016; Sanford et al., 2016; Tolonen et al., 2015).

Biometanol

Consolidada, a tecnologia de metanol de gás de síntese ou natural e carvão mineral é, todavia, dilemática à socioeconomia mundial. Além de biocombustível líquido, o metanol é matéria-prima à síntese de hidrocarbonetos: petroquímicas e biorrefinarias o introduzem à transesterificação de éster metil terc-butílico, formaldeído, ácido acético e biodiesel. A elevada cetanagem de metanol, propriedade associada ao tempo de resposta de combustível à ignição, permite misturá-lo à gasolina e bioetanol. Metilótrofos são microrganismos-chave à síntese de biometanol por oxidação de metano, facilmente, obtido por digestão anaeróbica (Khoshtinat et al., 2010; Siddiquee et al., 2011; Vasudevan et al., 2005). Embora a maioria de matérias-primas aplicadas à produção de biometanol seja madeireira, há opções não-lenhosas, especificamente: casca, palha e farelo de arroz, casca de banana e *pellets* de serragem de soja (Tabela 12).

Tabela 12. Rendimento de biometanol de resíduos não lenhosos.

Resíduo	Rendimento	Referência
Casca de arroz	39%	Nakagawa et al. (2007)
Palha de arroz	36%	Nakagawa et al. (2007)
Farelo de arroz	55%	Nakagawa et al. (2007)
Casca de banana	81,25%	Anitha et al. (2015)
<i>Pellets</i> de serragem de soja	6,8 g L ⁻¹	Shamsul et al. (2017)

Biobutanol

O biobutanol, substituto imediato ao GLP (gás liquefeito de petróleo) em estabelecimentos comerciais e domicílios, é opção à alimentação de motores propelidos a

bioetanol. A longa cadeia de hidrocarbonetos de biobutanol é, razoavelmente, apolar, conferindo-lhe, portanto, propriedades energéticas competitivas, em relação à gasolina; misturas são, inclusive, oportunas à melhoria de desempenho de combustão. Fermentação acetona-butanol-etanol é a principal rota tecnológica de produção deste bicombustível, culturalmente, atípico, porém promissor à diversificação de Matriz Energética Nacional. Aplicações adicionais incluem: solvente de cosméticos e fluidos hidráulicos, formulações detergentes, síntese de antibióticos, hormônios e vitaminas. A diversidade de matérias-primas, incluindo-se, principalmente, resíduos agrícolas, é favorável à expansão e consolidação de indústria de biobutanol (Kumar et al., 2011; Salehi Jouzani et al., 2015; Sheikh et al., 2015). Métodos de pré-tratamento de bagaço de cana, palha de arroz, sabugo e palhada de milho e capim Napier por micróbios secretores de bio-álcool prometem revolucionar o advertido quadro de onerosidade de tecnologias de conversão de biomassa em biobutanol, ofuscado por bicombustíveis, tecnicamente, similares, porém, economicamente, acessíveis (Tabela 13).

Tabela 13. Rendimento de biobutanol de resíduos de biomassa vegetal não lenhosos.

Resíduo	Pré-tratamento	Microrganismo	Rendimento	Referências
Palha de arroz	H ₂ O ₂ e NaOH a 120 °C	Co-cultivo bacteriano	2,9 g L ⁻¹	Cheng et al. (2012)
Sabugo de milho	Álcali	<i>C. cellulovorans</i> e <i>C. beijerinckii</i>	8,3 g L ⁻¹	Wen et al. (2014)
Palhada de milho	Solventes eutéticos profundos	<i>Clostridium saccharobutylicum</i>	5,6 g L ⁻¹	Xu et al. (2016)
Bagaço de cana	Hidrólise enzimática	<i>Clostridium acetobutylicum</i>	15,4-22,9 g 100 g ⁻¹	Pang et al. (2016)

3.5. Biomass-to-gas

Bio-hidrogênio

Insensível à emissão de gases de efeito estufa, o bio-hidrogênio é excelente alternativa à alimentação de células de carga e motores de combustão interna. O gás, atóxico, incolor, insípido e inodoro, proporciona o invejável poder calorífico de 143 GJ t⁻¹. Bio-fotólise, foto-fermentação e fermentação “escura” são as principais rotas tecnológicas de produção. Cianobactérias e microalgas são microrganismos, foto-metabolicamente, ativos, sinérgicos à transformação de matéria-prima em H₂ por bio-fotólise, conjugada em etapas. Bioquimicamente, similar à conversão anaeróbica, a foto-fermentação, sugestivamente, emprega micróbios fotossintéticos ao tratamento de substrato orgânico. Em relação à fermentação “escura”, biomassa, previa e devidamente, hidrolisada, é, acetogenicamente, convertida em radicais carboxílicos e hidrogênio, que, ao sofrer metanogênese, origina CH₄ e CO₂; estimula-se o rendimento técnico de bio-hidrogênio, obviamente, condicionado à composição físico-química de material precursor, inibindo-se, justamente, co-formação de metano e dióxido de carbono (Das et al., 2014; Elbeshbishy et al., 2011; Redwood et al., 2008; Sekoai et al., 2013; Show et al., 2011) Caule e palhada de

milho, palha de arroz e hidrolisado de palha de trigo, *in natura* e pré-tratados, possibilitam satisfatórios rendimentos técnicos (Tabela 14).

Tabela 14. Rendimento de bio-hidrogênio de resíduos de biomassa vegetal não lenhosos.

Resíduo	Rendimento	Referências
Caule de milho	41,5 mL g ⁻¹	Sekoai, Gueguim e Kana (2013)
Resíduos vegetais	0,9 mol mol ⁻¹ gás total	Bansal, Sreekrishnan e Singh (2013)
Palha de arroz	771 mL L ⁻¹	Sen et al. (2016)
Hidrolisado de palha de trigo	140,1 – 3277,7 cm ³ g ⁻¹	Lopez-Hidalgo, Sánchez e León-Rodríguez (2017)

O termotratamento de biomassa integrado a substâncias alcalinas e, ou, ácidas, é, extremamente, favorável à síntese de bio-hidrogênio; H₂SO₄ e NaOH são intermediários químicos consolidados à tecnologia, imperfeita, devido à dificuldade e onerosidade de custos de armazenamento e transporte. Propagação de ondas ultrassônicas e co-cultivo bacteriano otimizam rendimento (Gadhe et al., 2014)

Biometano

Tradicionalmente, produzido por digestão anaeróbica, o biometano é combustível gasoso de alto poder calorífico. Aliado ao bio-hidrogênio, o biometano origina, então, bio-hitano, alternativa ao abastecimento de frota pesada; Estados Unidos e República Popular da China são os principais consumidores mundiais de bio-hitano. Palha de arroz, biomassa desidratada de pinhão-manso, bagaço de cana e fração orgânica de resíduos sólidos urbanos são promissores à tecnologia (Tabela 15).

Tabela 15. Rendimento de biometano de resíduos não lenhos e bio-sólidos urbanos.

Resíduo	Rendimento	Referências
Palha de arroz	315,9 L kg ⁻¹	Chandra, Takeuchi e Hasegawa (2012)
Biomassa desidratada de pinhão-manso	178,4 mL L ⁻¹	Gadhe, Sonawane e Varma (2014)
Bagaço de cana-de-açúcar	1,6 N m ⁻³ g ⁻¹	Baêta et al. (2016)
Restos alimentares	94 mL g ⁻¹	Kumar e Lin (2013)

Em geral, cereais proporcionam resíduos ricos em carboidratos predestinados à produção de biocombustíveis líquidos e gasoso por processos fermentativos e digestivos, enquanto culturas sacarinas, extrativas, fibrosas e oleaginosas, ótimas matérias-primas lignocelulósicas para briquetes, pellets e biocarvão, cuja rotas de densificação requerem aglutinantes orgânicos, como açúcares, resinas, lignina amorfa e lipídeos à agregação de partículas (Figura 4).

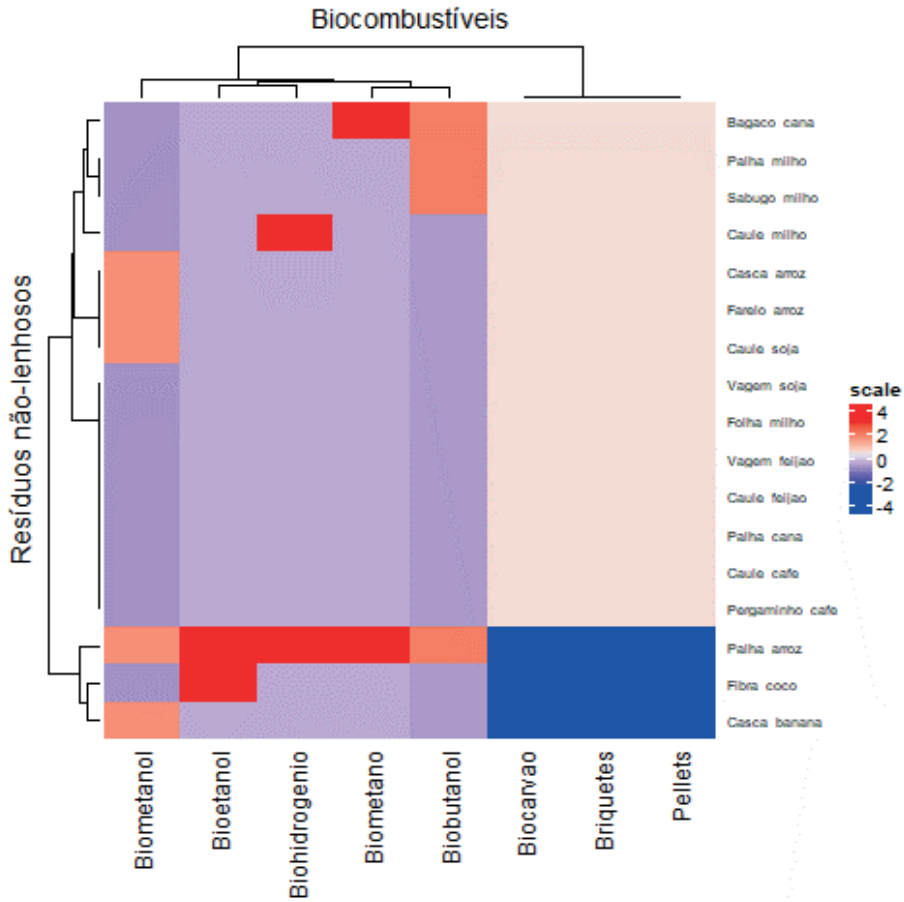


Figura 4. Mapeamento hierárquico aglomerativo de resíduos de biomassa vegetal não lenhosa para produção de biocombustíveis.

4. Considerações finais

O uso de biomassa, principalmente advindos da indústria da cana-de-açúcar no Brasil é um exemplo importante de sistema de produção sustentável de energia, em larga escala. Ainda existem alguns problemas nos sistemas de produção, mas podem ser resolvidos com a tecnologia já existente. O gargalo da produção está associado principalmente a crise política, econômica e institucional, norteados as ações sustentáveis para atender a necessidade do mundo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Na maioria dos aspectos relevantes para a sustentabilidade, a resolução de problemas ambientais gera estímulo ao empreendedorismo, à pesquisa, à inovação e à educação.

Referências

- Abedi, A., Dalai, A.K. Study on the quality of oat hull fuel pellets using bio-additives. *Biomass and Bioenergy*, [s. l.], v. 106, p. 166-175, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.08.024>
- ABILOGÁS. Associação Brasileira de Biogás e Biometano. O alto potencial do biogás como fonte de energia e combustível. 2019. <http://cempre.org.br/informa-mais/id/63/o-alto-potencial-do-biogas-como-fonte-de-energia-e-combustivel>
- Ágar, D.A., Rudolfsson, M., Kalén, G., Campargue, M., Da Silva Perez, D., Larsson, S.H. A systematic study of ring-die pellet production from forest and agricultural biomass. *Fuel Processing Technology*, [s. l.], v. 180, p. 47-55, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.08.006>
- Agência FAPESP. A bioenergia pode ajudar a mitigar as mudanças climáticas, por Elton Alisson, 2019. Extraído de: <http://agencia.fapesp.br/bioenergia-pode-ajudar-a-mitigar-as-mudancas-climaticas-reconhece-ipcc/31251/> 28 de agosto de 2019.
- Agroportal. A biomassa agrícola como fonte de biocombustíveis. Extraído de: <http://www.agroportal.pt/x/agronoticias/2004/09/26a.htm>. 14 de julho de 2019.
- Álvarez, A., Cachero, S., González-Sánchez, C., Montejo-Bernardo, J., Pizarro, C., Bueno, J.L. Novel method for holocellulose analysis of non-woody biomass wastes. *Carbohydrate Polymers*, [s. l.], v. 189, p. 250-256, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.043>
- Alves, M., Ponce, G.H.S.F., Silva, M.A., Ensinas, A.V. Surplus electricity production in sugarcane mills using residual bagasse and straw as fuel. *Energy*, [s. l.], v. 91, p. 751-757, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.101>
- Anitha, M., Kamarudin, S.K., Shamsul, N.S., Kofli, N.T. Determination of bio-methanol as intermediate product of anaerobic co-digestion in animal and agriculture wastes. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s. l.], v. 40, n. 35, p. 11791-11799, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.072>
- Aragón-Garita, S., Moya, R., Bond, B., Valaert, J., Tomazello Filho, M. Production and quality analysis of pellets manufactured from five potential energy crops in the Northern Region of Costa Rica. *Biomass and Bioenergy*, [s. l.], v. 87, p. 84-95, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.02.006>
- Asomaning, J., Haupt, S., Chae, M., Bressler, D.C. Recent developments in microwave-assisted thermal conversion of biomass for fuels and chemicals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 92, p. 642-657, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.084>
- Azargohar, R., Nanda, S., Kang, K., Bond, T., Karunakaran, C., Dalai, A.K., Kozinski, J.A. Effects of bio-additives on the physicochemical properties and mechanical behavior of canola hull fuel pellets. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 132, p. 296-307, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.003>
- Azócar, L., Hermosilla, N., Gay, A., Rocha, S., Díaz, J., Jara, P. Brown pellet production using wheat straw from southern cities in Chile. *Fuel*, [s. l.], v. 237, p. 823-832, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.039>

- Baêta, B.E.L., Lima, D.R.S., Adarme, O.F.H., Gurgel, L.V.A., Aquino, S.F. De. Optimization of sugarcane bagasse autohydrolysis for methane production from hemicellulose hydrolyzates in a biorefinery concept. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 200, p. 137-146, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.003>
- Bajwa, D.S., Peterson, T., Sharma, N., Shojaeiarani, J., Bajwa, S.G. A review of densified solid biomass for energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 96, p. 296-305, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.040>
- Balat, M., Balat, H. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Applied Energy*, [s. l.], v. 86, n. 11, p. 2273-2282, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.015>
- Banerjee, C., Ghosh, S., Sen, G., Mishra, S., Shukla, P., Bandopadhyay, R. Study of algal biomass harvesting using cationic guar gum from the natural plant source as flocculant. *Carbohydrate Polymers*, [s. l.], v. 92, n. 1, p. 675-681, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.09.022>
- Ban-Koffi, L., Han, Y.W. Alcohol production from pineapple waste. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 281-284, 1990. <https://doi.org/10.1007/BF01201297>
- Bansal, S.K., Sreekrishnan, T.R., Singh, R. Effect of Heat Pretreated Consortia on Fermentative Biohydrogen Production from Vegetable Waste. *National Academy Science Letters*, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 125-131, 2013. <https://doi.org/10.1007/s40009-013-0124-4>
- BCSD Portugal. Anuário de Sustentabilidade. Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável. Lisboa, Portugal. 116 p., 2007.
- BEN- Balanço energético nacional. Brasil. Empresa de Pesquisa Energética- EPE. Relatório Síntese, ano base 2017. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro: MME, 2018.
- Bilba, K., Arsene, M.-A., Ouensanga, A. Study of banana and coconut fibers: Botanical composition, thermal degradation and textural observations. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 98, n. 1, p. 58-68, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.030>
- Bilgic, E., Yaman, S., Haykiri-Acma, H., Kucukbayrak, S. Is torrefaction of polysaccharides-rich biomass equivalent to carbonization of lignin-rich biomass? *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 200, p. 201-207, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.032>
- Bonassa, G., Schneider, L.T., Canever, V.B., Cremonez, P.A., Frigo, E.P., Dieter, J., Teleken, J.G. Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [S.L.], V. 82, P. 2365-2378, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.075>
- Brenelli, L.B., Mandelli, F., Mercadante, A.Z., Rocha, G.J. De M., Rocco, S.A., Craievich, A.F., Gonçalves, A.R., Centeno, D. Da C., De Oliveira Neto, M., Squina, F.M. Acidification treatment of lignin from sugarcane bagasse results in fractions of reduced polydispersity and high free-radical scavenging capacity. *Industrial Crops and Products*, [s. l.], v. 83, p. 94-103, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.013>
- Cancela, A., Pérez, L., Febrero, A., Sánchez, A., Salgueiro, J.L., Ortiz, L. Exploitation of *Nannochloropsis gaditana* biomass for biodiesel and pellet production. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 133, p. 725-730, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.075>

- Cardozo, E., Malmquist, A. Performance comparison between the use of wood and sugarcane bagasse pellets in a Stirling engine micro-CHP system. *Applied Thermal Engineering*, [s. l.], p. 113945, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113945>
- Castello, D., Kruse, A., Fiori, L. Supercritical water gasification of hydrochar. *Chemical Engineering Research and Design, Green Processes and Eco-technologies*. [s. l.], v. 92, n. 10, Green Processes and Eco-technologies, p. 1864-1875, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.05.024>
- Chandra, R., Takeuchi, H., Hasegawa, T. Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 1462-1476, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.035>
- Chen, L., Xing, L., Han, L. Renewable energy from agro-residues in China: Solid biofuels and biomass briquetting technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 13, n. 9, p. 2689-2695, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.025>
- Chen, W.-H., Peng, J., Bi, X.T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 44, p. 847-866, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
- Chen, X., Yu, J., Zhang, Z., Lu, C. Study on structure and thermal stability properties of cellulose fibers from rice straw. *Carbohydrate Polymers*, [s. l.], v. 85, n. 1, p. 245-250, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.02.022>
- Cheng, C.-L., Che, P.-Y., Chen, B.-Y., Lee, W.-J., Lin, C.-Y., Chang, J.-S. Biobutanol production from agricultural waste by an acclimated mixed bacterial microflora. *Applied Energy, Clean Energy for Future Generations*. [s. l.], v. 100, Clean Energy for Future Generations, p. 3-9, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.042>
- Coelho, S. Entrevista para Agência Fapesp. Pesquisadora do Instituto de Energia e Ambiente - IEE, USP. RCGI- Centro de Pesquisa para Inovação em Gás. 2019. Extraído de: <http://agencia.fapesp.br/mapas-interativos-mostram-potencial-de-geracao-de-energia-do-biogas-em-sp/31264/> 28 de agosto de 2019.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Produção de etanol no Brasil mantém recorde com 33,14 bilhões de litros. Abril de 2019. Extraído de: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/2859-producao-de-etanol-no-brasil-mantem-recorde-e-alcanca-33-58-bilhoes-de-litros-em-28-de-agosto-de-2019>.
- Corredor, D.Y., Bean, S.R., Schober, T., Wang, D. Effect of Decortivating Sorghum on Ethanol Production and Composition of DDGS. *Cereal Chemistry*, [s. l.], v. 83, n. 1, p. 17-21, 2006. <https://doi.org/10.1094/CC-83-0017>
- Dagnino, E.P., Chamorro, E.R., Romano, S.D., Felissia, F.E., AreA, M.C. Optimization of the acid pretreatment of rice hulls to obtain fermentable sugars for bioethanol production. *Industrial Crops and Products*, [s. l.], v. 42, p. 363-368, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.019>
- Dantas, D.N. Uso da biomassa da cana de açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergetica e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista. 2010. 127f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

- Das, D., Khanna, N., Dasgupta, C.N., Khanna, N., Dasgupta, C.N. Biohydrogen Production: Fundamentals and Technology Advances. [s.l.]: CRC Press, 2014. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/9780429086564>>. Acesso em: 28 ago. 2018. <https://doi.org/10.1201/b16574>
- Demirbas, A. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. *Energy Conversion and Management*, [s. l.], v. 49, n. 8, p. 2106-2116, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.02.020>
- Directiva 2003/30/CE do Parlamento Europeu e do Conselho. Relativa à promoção de biocombustíveis ou de outros combustíveis renováveis nos transportes. *Jornal Oficial da União Européia*. 17/05/2003. L 123/42.
- Djatkov, D., Martinov, M., Kaltschmitt, M. Influencing parameters on mechanical-physical properties of pellet fuel made from corn harvest residues. *Biomass and Bioenergy*, [s. l.], v. 119, p. 418-428, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.009>
- Drobíková, K., Plachá, D., Motyka, O., Gabor, R., Kutláková, K.M., Vallová, S., Seidlerová, J. Recycling of blast furnace sludge by briquetting with starch binder: Waste gas from thermal treatment utilizable as a fuel. *Waste Management*, [s. l.], v. 48, p. 471-477, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.047>
- Eisenbies, M.H., Volk, T.A., Amidon, T.E., Shi, S. Influence of blending and hot water extraction on the quality of wood pellets. *Fuel*, [s. l.], v. 241, p. 1058-1067, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.12.120>
- Elbeshbishy, E., Hafez, H., Nakhla, G. Ultrasonication for biohydrogen production from food waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s. l.], v. 36, n. 4, p. 2896-2903, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.12.009>
- Fan, Y., Jin, L., Ji, W., Wang, J., Zhu, L., Zhao, W. Microwave-induced carbonization of rapeseed shell for bio-oil and bio-char: Multi-variable optimization and microwave absorber effect. *Energy Conversion and Management*, [s. l.], v. 191, p. 23-38, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.020>
- Faria, W.S., Protásio, T. De P., Trugilho, P.F., Pereira, B.L.C., Carneiro, A. De C.O., Andrade, C.R., Junior, J.B.G. Transformation of lignocellulosic waste of coffee into pellets for thermal power generation. *Coffee Science*, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 137-147, 2016.
- Fengel, D., Wegener, G. *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. [s.l.]: Walter de Gruyter, 2011. Google-Books-ID: x1B4ulTKnt0C.
- Fernandez-Anez, N., Slatter, D.J.F., Saeed, M.A., Phylaktou, H.N., Andrews, G.E., Garcia-Torrent, J. Ignition sensitivity of solid fuel mixtures. *Fuel*, [s. l.], v. 223, p. 451-461, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.106>
- Finney, K.N., Sharifi, V.N., Swithenbank, J. Fuel Pelletization with a Binder: Part I - Identification of a Suitable Binder for Spent Mushroom Compost-Coal Tailing Pellets. *Energy & Fuels*, [s. l.], v. 23, n. 6, p. 3195-3202, 2009. <https://doi.org/10.1021/ef900020k>
- Foo, K.Y. Value-added utilization of maize cobs waste as an environmental friendly solution for the innovative treatment of carbofuran. *Process Safety and Environmental Protection*, [s. l.], v. 100, p. 295-304, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.01.020>
- Fu, P.; Hu, S.; Sun, L., Xiang, J., Yang, T., Zhang, A., Zhang, J. Structural evolution of maize stalk/char particles during pyrolysis. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 100, n. 20, p. 4877-4883, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.009>

- Gadhe, A., Sonawane, S.S., Varma, M.N. Ultrasonic pretreatment for an enhancement of biohydrogen production from complex food waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s. l.], v. 39, n. 15, p. 7721-7729, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.105>
- Garcia, D.P., Caraschi, J.C., Ventorim, G., Vieira, F.H.A., De Paula Protásio, T. Assessment of plant biomass for pellet production using multivariate statistics (PCA and HCA). *Renewable Energy*, [s. l.], v. 139, p. 796-805, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.103>
- García-Torreiro, M., Pallín, M.Á., López-Abelairas, M., Lu-Chau, T.A., Lema, J.M. Alkali treatment of fungal pretreated wheat straw for bioethanol production. *Bioethanol*, [s. l.], v. 2, n. 1, 2016. Disponível em: <<https://www.degruyter.com/view/j/bioeth.2015.2.issue-1/bioeth-2015-0004/bioeth-2015-0004.xml>>. Acesso em: 28 ago. 2018. <https://doi.org/10.1515/bioeth-2015-0004>
- Genovese, A.I., Udaeta, M.E.M., Galvão, L.C.R. Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo. *Encontro de Energia no Meio Rural*, Na. 6, 2006. 10p.
- Gil, M.V., Oulego, P., Casal, M.D., Pevida, C., Pis, J.J., Rubiera, F. Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 101, n. 22, p. 8859-8867, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.062>
- Gilvari, H., De Jong, W., Schott, D.L. Quality parameters relevant for densification of bio-materials: Measuring methods and affecting factors - A review. *Biomass and Bioenergy*, [s. l.], v. 120, p. 117-134, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.013>
- Glushkov, D., Paushkina, K., Shabardin, D., Strizhak, P., Gutareva, N. Municipal solid waste recycling by burning it as part of composite fuel with energy generation. *Journal of Environmental Management*, [s. l.], v. 231, p. 896-904, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.067>
- Go, A.W., Conag, A.T., Igdon, R.M.B., Toledo, A.S., Malila, J.S. Potentials of agricultural and agro-industrial crop residues for the displacement of fossil fuels: A Philippine context. *Energy Strategy Reviews*, [s. l.], v. 23, p. 100-113, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.12.010>
- Gonçalves, F.A., Ruiz, H.A., Nogueira, C. Da C., Santos, E.S. Dos; Teixeira, J.A., Macedo, G.R. De. Comparison of delignified coconuts waste and cactus for fuel-ethanol production by the simultaneous and semi-simultaneous saccharification and fermentation strategies. *Fuel*, [s. l.], v. 131, p. 66-76, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.021>
- Gonçalves, G. da C., Pereira, N.C., Veit, M.T. Production of bio-oil and activated carbon from sugarcane bagasse and molasses. *Biomass and Bioenergy*, [s. l.], v. 85, p. 178-186, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.12.013>
- Goyal, H.B., Seal, D., Saxena, R.C. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 12, n. 2, p. 504-517, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.014>
- Grimoni, J.a.b, Galvão, L.c.r, Udaeta, M.e.M, "Iniciação a Conceitos de Sistemas Energéticos para o Desenvolvimento Limpo", Edusp, São Paulo 2004.

- Gunukula, S., Daigneault, A., Boateng, A.A., Mullen, C.A., Desisto, W.J., Wheeler, M.C. Influence of upstream, distributed biomass-densifying technologies on the economics of biofuel production. *Fuel*, [s. l.], v. 249, p. 326-333, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.079>
- Guo, G.-L., Hsu, D.-C., Chen, W.-H., Chen, W.-H., Hwang, W.-S. Characterization of enzymatic saccharification for acid-pretreated lignocellulosic materials with different lignin composition. *Enzyme and Microbial Technology*, [s. l.], v. 45, n. 2, p. 80-87, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2009.05.012>
- Guo, X., Yao, L., Huang, Q. Aeration and mass transfer optimization in a rectangular airlift loop photobioreactor for the production of microalgae. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 190, p. 189-195, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.077>
- Gupta, P.L., Lee, S.-M., Choi, H.-J. A mini review: photobioreactors for large scale algal cultivation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, [s. l.], v. 31, n. 9, p. 1409-1417, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11274-015-1892-4>
- Hassan, S.S., Williams, G.A., Jaiswal, A.K. Lignocellulosic Biorefineries in Europe: Current State and Prospects. *Trends in Biotechnology*, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 231-234, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.07.002>
- Hays, S.G., Ducat, D.C. Engineering cyanobacteria as photosynthetic feedstock factories. *Photosynthesis Research*, [s. l.], v. 123, n. 3, p. 285-295, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11120-014-9980-0>
- Hernández-Pérez, A.F., de Arruda, P.V., Felipe, M. das G. de A. Sugarcane straw as a feedstock for xylitol production by *Candida guilliermondii* FTI 20037. *Brazilian Journal of Microbiology*, [s. l.], v. 47, n. 2, p. 489-496, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.01.019>
- IEE. Instituto de Energia e Ambiente. USP. Fontes de Biomassa. Extraído de: <http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/?q=pt-br/livro/fontes-de-biomassa>. 26 de novembro de 2018.
- Iftikhar, M., Asghar, A., Ramzan, N., Sajjadi, B., Chen, W. Biomass densification: Effect of cow dung on the physicochemical properties of wheat straw and rice husk based biomass pellets. *Biomass and Bioenergy*, [s. l.], v. 122, p. 1-16, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.005>
- Ishii, K., Furuichi, T. Influence of moisture content, particle size and forming temperature on productivity and quality of rice straw pellets. *Waste Management*, [s. l.], v. 34, n. 12, p. 2621-2626, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.008>
- Jeong, C.Y., Dodla, S.K., Wang, J.J. Fundamental and molecular composition characteristics of biochars produced from sugarcane and rice crop residues and by-products. *Chemosphere*, Biochars multifunctional role as a novel technology in the agricultural, environmental, and industrial sectors. [s. l.], v. 142, Biochars multifunctional role as a novel technology in the agricultural, environmental, and industrial sectors, p. 4-13, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.05.084>
- Kaliyan, N., Morey, R.V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 101, n. 3, p. 1082-1090, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.064>

- Kaparaju, P., Serrano, M., Thomsen, A.B., Kongjan, P., Angelidaki, I. Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 100, n. 9, p. 2562-2568, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.011>
- Kashiwaya, Y., Nakamitsu, T., Kinoshita, H., Miura, S. Binding Energy of Carbon Implanted into Hematite and in situ Observation of Reaction Behavior during Heating Up Experiment. *ISIJ International*, [s. l.], v. 51, n. 8, p. 1204-1212, 2011. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1204>
- Khalil, H.P.S.A., Alwani, M.S., Omar, A.K.M. Chemical composition, anatomy, lignin distribution, and cell wall structure of malaysian plant waste fibers. *BioResources*, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 220-232, 2006.
- Khoshtinat, M., Amin, N.A.S., Noshadi, I. A review of methanol production from methane oxidation via non-thermal plasma reactor. In: 2010, Anais... [s.l: s.n.]
- Kirubakaran, V., Sivaramakrishnan, V., Nalini, R., Sekar, T., Premalatha, M., Subramanian, P. A review on gasification of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 179-186, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.07.001>
- Kumar, G., Lin, C.-Y. Bioconversion of de-oiled Jatropha Waste (DJW) to hydrogen and methane gas by anaerobic fermentation: Influence of substrate concentration, temperature and pH. *International Journal of Hydrogen Energy, European Fuel Cell* 2011. [s. l.], v. 38, n. 1, *European Fuel Cell* 2011, p. 63-72, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.10.053>
- Kumar, M., Gayen, K. Developments in biobutanol production: New insights. *Applied Energy*, [s. l.], v. 88, n. 6, p. 1999-2012, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.055>
- Leite, R.C.C., Leal, R.L.V., Cortez, L.A.B., Griffin, W.M., Scandiffio, M.I.G., Can Brazil replace 5% of the 2025 gasoline world demand with ethanol? *Energy*. *Energy* 34 (2009) 655-661. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.11.001>
- Lela, B., Barišić, M., Nižetić, S. Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical-mechanical and thermal characteristics. *Waste Management, Refuse Derived Fuel/Solid Recovered Fuel*. [s. l.], v. 47, *Refuse Derived Fuel/Solid Recovered Fuel*, p. 236-245, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.035>
- Li, X.; Kim, T.H., NghieM, N.P. Bioethanol production from corn stover using aqueous ammonia pretreatment and two-phase simultaneous saccharification and fermentation (TPSSF). *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 101, n. 15, p. 5910-5916, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.015>
- Li, Y.; Zhao, H., Duan, L.-R., Li, H., Yang, Q., Tu, H.-H., Cao, W., Wang, S.-W. Preparation, characterization and evaluation of bufalin liposomes coated with citrus pectin. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, [s. l.], v. 444, p. 54-62, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2013.12.006>
- Lohri, C.R., Rajabu, H.M., Sweeney, D.J., Zurbrügg, C. Char fuel production in developing countries - A review of urban biowaste carbonization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], V. 59, P. 1514-1530, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.088>

- Lopes Silva, D.A., Delai, I., Delgado Montes, M.L., Roberto OmettO, A. Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 32, p. 532-547, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.056>
- Lopez-Hidalgo, A.M., Sánchez, A., De León-Rodríguez, A. Simultaneous production of bioethanol and biohydrogen by *Escherichia coli* WDHL using wheat straw hydrolysate as substrate. *Fuel*, [s. l.], v. 188, p. 19-27, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.022>
- Lubwama, M., Yiga, V.A. Development of groundnut shells and bagasse briquettes as sustainable fuel sources for domestic cooking applications in Uganda. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 111, p. 532-542, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.041>
- Luna, H., Hernández-Vázquez, L., Reyó, A., Arias, L., Manjarrez, N., Navarro-Ocaña, A. Banana and maize leaf wastes as a green alternative for the preparation of benzyl alcohols used as starting materials for fragrances. *Industrial Crops and Products*, [s. l.], v. 59, p. 105-108, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.04.023>
- Mendoza Martinez, C.L., Sermyagina, E., De Cassia Oliveira Carneiro, A., Vakkilainen, E., Cardoso, M. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, [s. l.], v. 123, p. 70-77, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.013>
- Michelangelli, O.P., Gaspar-Cunha, A., Covas, J.A. The influence of pellet-barrel friction on the granular transport in a single screw extruder. *Powder Technology*, [s. l.], v. 264, p. 401-408, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.066>
- Mielenz, J.R. Ethanol production from biomass: technology and commercialization status. *Current Opinion in Microbiology*, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 324-329, 2001. [https://doi.org/10.1016/S1369-5274\(00\)00211-3](https://doi.org/10.1016/S1369-5274(00)00211-3)
- Ministério das Minas e Energia. Matriz energética Nacional 2030. Empresa de Pesquisa Energetica (EPE). Brasília. DF: Brasil/MME/EPE. Disponível em: <http://legado.brasil.gov.br/noticias/meio-ambiente/2010/11/matriz-energetica>. Acesso em: 01 jul. 2019.
- Ministério das Minas e Energia. Biomassa é a segunda maior fonte de energia em 2016. Empresa de Pesquisa Energetica (EPE). Brasília. DF: Brasil/MME/EPE. 2017.
- Moers, E.m.; Vieira, A.c.; Fernanades, D.m.; Souza, S.n.m.; Bariccatti, R.A. Caracterização da biomassa residual proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia. I Congresso Latino americano de Suinocultura e Sustentabilidade Ambiental, Colassa. 2011, Foz do Iguaçu, PR. <http://inbradess.org.br/wp-content/uploads/2012/01/t06.pdf>
- Molino, A., Chianese, S., Musmarra, D. Biomass gasification technology: The state of the art overview. *Journal of Energy Chemistry*, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 10-25, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005>
- Moya, R., Rodríguez-Zúñiga, A., Tenorio, C., Valdez, J., Valaert, J. Pellets Evaluation Made from Tropical-Climate Agricultural and Forestry Crops of Costa Rica with a Domestic Stove. *Waste and Biomass Valorization*, [s. l.], v. 6, n. 6, p. 1037-1046, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9420-1>

- Naik, S.N., Goud, V.V., Rout, P.K., Dalai, A.K. Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 578-597, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>
- Nakagawa, H., Harada, T., Ichinose, T., Takeno, K., Matsumoto, S., Kobayashi, M., SaKAI, M. Biomethanol Production and CO₂ Emission Reduction from Forage Grasses, Trees, and Crop Residues. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, [s. l.], v. 41, n. 2, p. 173-180, 2007. <https://doi.org/10.6090/jarq.41.173>
- Neves, P.V., Pitarelo, A.P., Ramos, L.P. Production of cellulosic ethanol from sugarcane bagasse by steam explosion: Effect of extractives content, acid catalysis and different fermentation technologies. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 208, p. 184-194, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.085>
- Nhuchhen, D.R., Afzal, M.T., Dreise, T., Salema, A.A. Characteristics of biochar and bio-oil produced from wood pellets pyrolysis using a bench scale fixed bed, microwave reactor. *Biomass and Bioenergy*, [s. l.], v. 119, p. 293-303, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.09.035>
- Nigam, P.S., Singh, A. Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science*, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 52-68, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2010.01.003>
- Nogueira, L.A.H., Lora, Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações. 2ª edição, 2003.
- Nordin, R., Said, C.M.S., Ismail, H. Properties of rice husk powder/natural rubber composite. *Solid State Science and Technology*, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 9, 2007.
- Ottoboni, J. Cesp pesquisa potencial de biomassa de SP para gerar energia. Agência Envolverde. 2018. Extraído de: <https://envolverde.cartacapital.com.br/cesp-pesquisa-potencial-de-biomassa-de-sp-para-gerar-energia/> Acessado em 28 de agosto de 2019.
- Owamah, H.I., Izinyon, O.C. The effect of organic loading rates (OLRs) on the performances of food wastes and maize husks anaerobic co-digestion in continuous mode. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, [s. l.], v. 11, p. 71-76, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.06.002>
- Pandey, A., Soccol, C.R., Mitchell, D. New developments in solid state fermentation: I-bioprocesses and products. *Process Biochemistry*, [s. l.], v. 35, n. 10, p. 1153-1169, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(00\)00152-7](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(00)00152-7)
- Pang, Z.-W., Lu, W., Zhang, H., Liang, Z.-W., Liang, J.-J., Du, L.-W., Duan, C.-J., Feng, J.-X. Butanol production employing fed-batch fermentation by *Clostridium acetobutylicum* GX01 using alkali-pretreated sugarcane bagasse hydrolysed by enzymes from *Thermoascus aurantiacus* QS 7-2-4. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 212, p. 82-91, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.013>
- Pattanaik, L., Pattnaik, F., Saxena, D.K., Naik, S.N. Chapter 5 - Biofuels from agricultural wastes. In: Basile, A., Dalena, F. (Eds.). *Second and Third Generation of Feedstocks*. [s.l.]: Elsevier, 2019. p. 103-142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815162-4.00005-7>
- Paula, L.E. de R. E; Trugilho, P.F., Napoli, A., Bianchi, M.L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. *Cerne*, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000200012>

- Pena, R.F.A. Fontes de Energia do Brasil. <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/fontes-energia-brasil.htm>. 28 de agosto de 2019.
- Pohlmann, J.G., Osório, E., Vilela, A.C.F., Diez, M.A., Borrego, A.G. Integrating physicochemical information to follow the transformations of biomass upon torrefaction and low-temperature carbonization. *Fuel*, [s. l.], v. 131, p. 17-27, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.067>
- Portugal-Pereira, J., Soria, R., Rathmann, R., Schaeffer, R., Szklo, A. Agricultural and agro-industrial residues-to-energy: Techno-economic and environmental assessment in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, [s. l.], v. 81, p. 521-533, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.08.010>
- Pradhan, P., Mahajani, S.M., Arora, A. Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, [s. l.], v. 181, p. 215-232, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>
- Protásio, T. De P., Alves, I.C.N., Trugilho, P.F., Silva, V.O., Baliza, A.E.R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, [s. l.], v. 31, n. 68, p. 273, 2011. <https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.68.273>
- Protocolo de Kyoto. Ministério da Ciência e Tecnologia, Ministério das Relações Exteriores da República Federativa do Brasil. Editado e Traduzido. 1997.
- RCGI. Research Centre for Gas Innovation. RCGI lança mapas interativos com o potencial de geração de energia do biogás em SP. 2019 <https://www.rcgi.poli.usp.br/pt-br/rcgi-lanca-mapas-interativos-com-o-potencial-de-geracao-de-energia-por-biogas-em-sp/>
- Ragauskas, A.J., Beckham, G.T., Bidy, M.J., Chandra, R., Chen, F., Davis, M.F., Davison, B.H., Dixon, R.A., Gilna, P., Keller, M., Langan, P., Naskar, A.K., Saddler, J.N., Tschaplinski, T.J., Tuskan, G.A., Wyman, C.E. Lignin Valorization: Improving Lignin Processing in the Biorefinery. *Science*, [s. l.], v. 344, n. 6185, p. 1246843, 2014. <https://doi.org/10.1126/science.1246843>
- Ramos, J.-L., Valdivia, M., García-Lorente, F., Segura, A. Benefits and perspectives on the use of biofuels. *Microbial Biotechnology*, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 436-440, 2016. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12356>
- Rashad, A. Cementitious materials and agricultural wastes as natural fine aggregate replacement in conventional mortar and concrete. *Journal of Building Engineering*, [s. l.], v. 5, p. 119-141, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.11.011>
- Redwood, M.D., Paterson-Beedle, M., Macaskie, L.E. Integrating dark and light bio-hydrogen production strategies: towards the hydrogen economy. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 149, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11157-008-9144-9>
- Reza, M.T., Uddin, M.H., Lynam, J.G., Coronella, C.J. Engineered pellets from dry torrefied and HTC biochar blends. *Biomass and Bioenergy*, [s. l.], v. 63, p. 229-238, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.038>
- Rodriguez, M.B. Castilla Urbano, F. (ed.) (2014): *Discursos legitimadores de la conquista y la colonización de América*/ Castilla Urbano, F. (ed.) (2015): *Visiones de la conquista y la colonización de las Américas*, Alcalá de Henares:Universidad de Alcalá de Henares. *Daimon Revista Internacional de Filosofía*, [s. l.], n. 69, p. 182-186, 2016. <https://doi.org/10.6018/daimon/259761>

- Rueda-Ordóñez, Y.J., Tannous, K. Thermal decomposition of sugarcane straw, kinetics and heat of reaction in synthetic air. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 211, p. 231-239, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.035>
- Saha, B.C., Cotta, M.A. Ethanol Production from Alkaline Peroxide Pretreated Enzymatically Saccharified Wheat Straw. *Biotechnology Progress*, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 449-453, 2006. <https://doi.org/10.1021/bp050310r>
- Saiter, O. Utilização de resíduos agrícolas e florestais como fonte de energia para a secagem de grãos de Coffea canephora var. Conilon. 2008. Monografia (trabalho de conclusão do curso de Engenharia Florestal) Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: 2008.
- Salehi Jouzani, G., Taherzadeh, M.J. Advances in consolidated bioprocessing systems for bioethanol and butanol production from biomass: a comprehensive review. *Biofuel Research Journal*, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 152-195, 2015. <https://doi.org/10.18331/BRJ2015.2.1.4>
- Salomão, A. Apagão de idéias. *Época Negócios*. São Paulo: Gobo, ano 2, n. 11 maio 2009.
- Sanchez Rizza, L., Sanz Smachetti, M.E., Do Nascimento, M., Salerno, G.L., Curatti, L. Bioprospecting for native microalgae as an alternative source of sugars for the production of bioethanol. *Algal Research*, [s. l.], v. 22, p. 140-147, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.12.021>
- Sanford, K., Chotani, G., Danielson, N., Zahn, J.A. Scaling up of renewable chemicals. *Current Opinion in Biotechnology, Energy biotechnology • Environmental biotechnology*. [s. l.], v. 38, *Energy biotechnology • Environmental biotechnology*, p. 112-122, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.01.008>
- Santos, V.E.N., Ely, R.N., Szklo, A.S., Magrini, A. Chemicals, electricity and fuels from biorefineries processing Brazil's sugarcane bagasse: Production recipes and minimum selling prices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 53, p. 1443-1458, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.069>
- Saqib, N.U., Baroutian, S., Sarmah, A.K. Physicochemical, structural and combustion characterization of food waste hydrochar obtained by hydrothermal carbonization. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 266, p. 357-363, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.112>
- Scaife, M.A., Nguyen, G.T.D.T., Rico, J., Lambert, D., Helliwell, K.E., Smith, A.G. Establishing *Chlamydomonas reinhardtii* as an industrial biotechnology host. *The Plant Journal*, [s. l.], v. 82, n. 3, p. 532-546, 2015. <https://doi.org/10.1111/tpj.12781>
- Sekoai, P.T., Gueguim Kana, E.B. A two-stage modelling and optimization of biohydrogen production from a mixture of agro-municipal waste. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s. l.], v. 38, n. 21, p. 8657-8663, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.04.130>
- Sen, B., Chou, Y.-P., Wu, S.-Y., Liu, C.-M. Pretreatment conditions of rice straw for simultaneous hydrogen and ethanol fermentation by mixed culture. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s. l.], v. 41, n. 7, p. 4421-4428, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.10.147>

- Shamsul, N.S., Kamarudin, S.K., Kofli, N.T., Rahman, N.A. Optimization of bio-methanol production from goat manure in single stage bio-reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*, Special Issue on Sustainable Fuel Cell and Hydrogen Technologies: The 5th International Conference on Fuel Cell and Hydrogen Technology (ICFCHT 2015), 1-3 September 2015, Kuala Lumpur, Malaysia. [s. l.], v. 42, n. 14, Special Issue on Sustainable Fuel Cell and Hydrogen Technologies: The 5th International Conference on Fuel Cell and Hydrogen Technology (ICFCHT 2015), 1-3 September 2015, Kuala Lumpur, Malaysia, p. 9031-9043, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.03.200>
- Sheikh, M.M.I., Kim, C.-H., Park, H.-H., Nam, H.-G., Lee, G.S., Jo, H.S., Lee, J.-Y., Kim, J.W. A synergistic effect of pretreatment on cell wall structural changes in barley straw (*Hordeum vulgare* L.) for efficient bioethanol production. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, [s. l.], v. 95, n. 4, p. 843-850, 2015. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7004>
- Sheikhdavoodi, M.J., Almassi, M., Ebrahimi-Nik, M., Kruse, A., Bahrami, H. Gasification of sugarcane bagasse in supercritical water; evaluation of alkali catalysts for maximum hydrogen production. *Journal of the Energy Institute*, [s. l.], v. 88, n. 4, p. 450-458, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.10.005>
- Show, K.-Y., Lee, D.-J., Zhang, Z.-P. Chapter 20 - Production of Biohydrogen: Current Perspectives and Future Prospects. In: Pandey, A., Larroche, C., Ricke, S.C., Dussap, C.-G., Gnansounou, E. (Eds.). *Biofuels*. Amsterdam: Academic Press, 2011. p. 467-479.
- Siddiquee, M.N., Rohani, S. Lipid extraction and biodiesel production from municipal sewage sludges: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 1067-1072, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.029>
- Siritherasas, P., Waiyanate, P., Sekiguchi, H., Kodama, S. Torrefaction of Municipal Solid Waste (MSW) Pellets using Microwave Irradiation with the Assistance of the Char of Agricultural Residues. *Energy Procedia*, 2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies. [s. l.], v. 138, 2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies, p. 668-673, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.190>
- SNA - Sociedade Nacional de Agricultura. Palha de cana pode gerar energia para suprir 70% do consumo residencial no País. <https://www.sna.agr.br/palha-de-cana-pode-gerar-energia-para-suprir-70-do-consumo-residencial-no-pais/>. Acesso em: 02 jul 2019.
- Stanmore, B.R. Generation of Energy from Sugarcane Bagasse by Thermal Treatment. *Waste and Biomass Valorization*, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 77-89, 2010. <https://doi.org/10.1007/s12649-009-9000-3>
- Sun, X., Cao, Y., Xu, H., Liu, Y., Sun, J., Qiao, D., Cao, Y. Effect of nitrogen-starvation, light intensity and iron on triacylglyceride/carbohydrate production and fatty acid profile of *Neochloris oleoabundans* HK-129 by a two-stage process. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 155, p. 204-212, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.109>
- Tapasvi, D., Kempegowda, R.S., Tran, K.-Q., Skreiberg, Ø., Grønli, M. A simulation study on the torrefied biomass gasification. *Energy Conversion and Management*, [s. l.], v. 90, p. 446-457, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.027>

- Theerarattananon, K., Xu, F., Wilson, J., Ballard, R., Mckinney, L., Staggenborg, S., Vadlani, P., Pei, Z.J., Wang, D. Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. *Industrial Crops and Products*, [s. l.], v. 33, n. 2, p. 325-332, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.11.014>
- Tolonen, A.C., Zuroff, T.R., Ramya, M., Boutard, M., Cerisy, T., Curtis, W.R. Physiology, Genomics, and Pathway Engineering of an Ethanol-Tolerant Strain of Clostridium phytofermentans. *Applied and Environmental Microbiology*, [s. l.], v. 81, n. 16, p. 5440-5448, 2015. <https://doi.org/10.1128/AEM.00619-15>
- Tran, K.-Q., Luo, X., Seisenbaeva, G., Jirjis, R. Stump torrefaction for bioenergy application. *Applied Energy*, [s. l.], v. 112, p. 539-546, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.053>
- Tripathi, M., Sahu, J.N., Ganesan, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 55, p. 467-481, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>
- UDOP- Energia que Renova. Fronteiras do etanol de cana-de-açúcar. Disponível em: <https://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=1165756>. Acesso em: 31 ago 2019.
- Valdivia, M., Galan, J.L., Laffarga, J., Ramos, J.-L. Biofuels 2020: Biorefineries based on lignocellulosic materials. *Microbial Biotechnology*, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 585-594, 2016. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12387>
- Vasudevan, P., Sharma, S., Kumar, A. Liquid fuel from biomass: An overview. *JSIR Vol.64(11)* [November 2005], [s. l.], 2005. Disponível em: <<http://nopr.niscair.res.in/handle/123456789/5373>>. Acesso em: 28 ago. 2019.
- Wang, J., Liu, J., Liu, T. The difference in effective light penetration may explain the superiority in photosynthetic efficiency of attached cultivation over the conventional open pond for microalgae. *Biotechnology for Biofuels*, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 49, 2015. <https://doi.org/10.1186/s13068-015-0240-0>
- Wen, Z., Wu, M., Lin, Y., Yang, L., Lin, J., Cen, P. Artificial symbiosis for acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation from alkali extracted deshelled corn cobs by co-culture of Clostridium beijerinckii and Clostridium cellulovorans. *Microbial Cell Factories*, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 92, 2014. <https://doi.org/10.1186/s12934-014-0092-5>
- Werther J. et al. Combustion of agricultural residues. *Progress in energy and combustion science*. Alemanha: Pergamon, v.26, p. 1-27, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(99\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(99)00005-2)
- Wi, S.G., Choi, I.S., Kim, K.H., Kim, H.M., Bae, H.-J. Bioethanol production from rice straw by popping pretreatment. *Biotechnology for Biofuels*, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 166, 2013. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-166>
- Wongsiriamnuay, T., Tippayawong, N. Effect of densification parameters on the properties of maize residue pellets. *Biosystems Engineering*, [s. l.], v. 139, p. 111-120, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.009>
- Xu, G.-C., Ding, J.-C., Han, R.-Z., Dong, J.-J., Ni, Y. Enhancing cellulose accessibility of corn stover by deep eutectic solvent pretreatment for butanol fermentation. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 203, p. 364-369, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.002>

- Yahya, M.A., Al-Qodah, Z., Ngah, C.W.Z. Agricultural bio-waste materials as potential sustainable precursors used for activated carbon production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 46, p. 218-235, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.051>
- Yildiz, G., Ronsse, F., Duren, R. Van; Prins, W. Challenges in the design and operation of processes for catalytic fast pyrolysis of woody biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 57, p. 1596-1610, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.202>
- Zhang, L., Liu, R., Yin, R., Mei, Y. Upgrading of bio-oil from biomass fast pyrolysis in China: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 24, p. 66-72, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.027>

Maíz en Cuba

**Rolando Ramírez-Olivera, Ramón Núñez-Tablada,
Juan Alejandro Villazón Gómez, Vilma López Cruz,
Roberto Alejandro García Reyes**

Centro de Estudios para Agroecosistemas Áridos (CEAAR). Universidad de Holguín. Avenida Los Libertadores n/247, Ciudad de Holguín, Cuba.

*Autor para correspondencia: rolando@uho.edu.cu

1. Descripción

1.1. Características generales

El maíz es uno de los cereales (Gramíneas), de mayor importancia económica en el mundo pertenece a la familia de las poaceas. Es de porte robusto de fácil desarrollo y de producción anual.



Figura 1. Plantación de maíz en la etapa de cosecha de los granos.

La cultivo del maíz (*Zea mays*) se destaca en el contexto de la integración de cultivos-ganadería debido a las innumerables aplicaciones que ese cereal tiene dentro de la propiedad agrícola ya sea en la alimentación animal en forma de granos o de forraje verde o conservado (rollo, ensilaje), en la alimentación humana o en la generación de ingresos mediante la comercialización de la producción excedente (Permuy, 2005).

Sistema radicular

Las raíces son fasciculadas y su misión es la de aportar un perfecto anclaje a la planta. El maíz presenta tres tipos de raíces, una primaria o seminal desarrollándose de primordios del embrión y se fijan en la plántula durante dos o tres semanas como máximo. Las raíces secundarias nacen de los primeros nudos del tallo, que se encuentran debajo de la superficie del suelo o inicial de su crecimiento por encima del mesocotilo, generalmente se desarrollan a una profundidad de 20 cm y van formando una especie de anillos, las raíces penetran hasta 2 m de profundidad y se extiende hasta cubrir una superficie de un círculo de 1.2 m de radio. Las raíces adventicias surgen encima de la superficie del suelo.

Tallo

El tallo es simple, erecto, de elevada longitud pudiendo alcanzar los 4 metros de altura y hasta 7 m, es robusto y sin ramificaciones. La elongación de los entrenudos ocurre después de la diferenciación total de los nudos y ocurre cuando el meristemo está aún debajo de la superficie del suelo, cuando los entrenudos comienzan a elongarse, la planta entra en una fase de rápido crecimiento vertical. El tallo además de soportar la hojas y partes florales sirven también como órgano de reservas (acumulación de sacarosa), el almacenamiento ocurre después del crecimiento vegetativo y antes del inicio de hinchamiento de los granos.

Hojas

Las hojas son largas, de gran tamaño, lanceoladas, alternas, paralelinervias. Se encuentran abrazadas al tallo y por el haz presenta vellosidades. Los extremos de las hojas son muy afilados y cortantes.

Flores

El maíz es una planta monoica con flores masculinas y femeninas separadas. Con la emisión de la espiga el crecimiento de la parte aérea cesa y el de la raíz es muy poco, las flores masculina aparecen antes (4 a 5 días) que la femenina y están situadas en la parte superior del tallo. Las flores femeninas están situadas en las axilas de las hojas, representada por lo que comúnmente denominamos mazorca, el maíz bajo polinización abierta tiene entre el 80 y 95% de polinización cruzada y un 5 a 20% presenta autofecundación.

Las flores pistiladas (femeninas) se encuentran en una inflorescencia con un soporte central denominado tusa, cubierto de brácteas foliares. La floración normalmente ocurre cerca de 50 a 100 días después de la siembra.

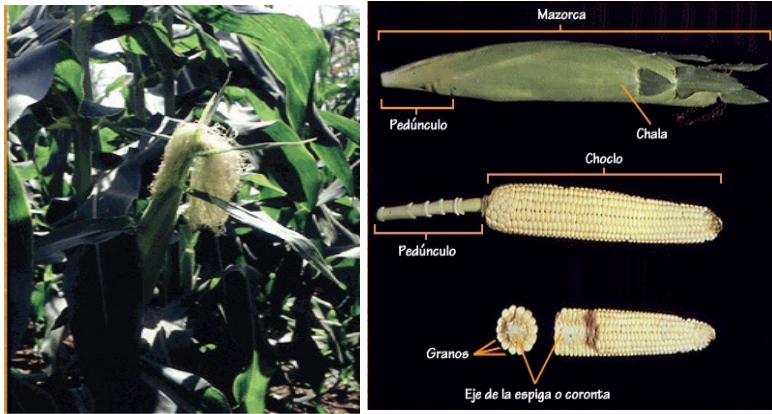


Figura 2. Inflorescencia femenina en el maíz.

Las flores estaminadas (masculinas) se encuentran dispuestas por pareja en espiguillas, estas últimas se distribuyen en ramas de la inflorescencia conocida comúnmente como espiga, tienen de 6 a 10 milímetro. Cada flor tiene 3 estambres largamente filamentosos.



Figura 3. Inflorescencia masculina en el maíz.

2. Distribución

Diversos autores localizan el origen del maíz en Centro América y México. Se cultiva en más de 70 países, siendo el cultivo con mayor distribución en todo el mundo, cultivándose en los cinco continentes, aunque su zona fundamental es el continente americano.

3. Exigencias del cultivo

3.1. Temperaturas

El maíz requiere temperaturas óptimas de 20 a 30 °C. Son plantas con gran superficie foliar, se caracteriza por un elevado potencial fotosintético y productivo al poseer metabolismo fotosintético C4. Necesita bastante luminosidad y por eso en climas húmedos su rendimiento es más bajo. Para que se produzca la germinación en la semilla la temperatura del suelo debe situarse entre los 10 a 20 °C. El maíz llega a soportar temperaturas mínimas de 6-8 °C. A partir de los 30 °C pueden aparecer problemas serios de absorción de nutrientes minerales y agua, es una planta muy sensible a las altas temperaturas y a la falta de humedad en el suelo. La temperatura ideal para la fructificación oscila de 20 a 32 °C.

3.2. Necesidades de agua

El maíz es cultivado en regiones cuyas precipitaciones varían de 300 a 5.000 mm anuales, siendo la cantidad de agua consumida por una planta durante su ciclo en torno a los 600 mm. Dos días de estrés hídrico la floración disminuye el rendimiento en más de 20%, cuatro a ocho días disminuye en más de 50%. Las necesidades hídricas van variando a lo largo del cultivo, cuando las plantas comienzan a germinar se requiere menos cantidad de agua, pero sí mantener una humedad constante. En la fase del crecimiento vegetativo es cuando más cantidad de agua se requiere y se recomienda dar un riego unos 10 a 15 días antes de la floración, siendo este el periodo más crítico. No toleran los periodos prolongados de sequía

3.3. Necesidades nutricionales

De forma general, el maíz demanda 100 kg·ha⁻¹ de N, 90 kg·ha⁻¹ de P y 80 kg·ha⁻¹ de K, en dependencia de la fertilidad del suelo y el ciclo de las variedades. En sistemas de bajos insumos cuando es sembrado en rotación con otros cultivos ampliamente fertilizados, no es necesaria la aplicación de fertilizantes.

3.4. Exigencias de suelo

Se estima como óptima una profundidad del suelo alrededor de los 100 cm para lograr altos rendimientos, aun cuando puede ser cultivado en suelos de profundidad efectiva superior a 40 cm, siempre que descansen sobre un sustrato abierto al paso de las raíces. Requiere suelos de texturas medias (franco), sin embargo tolera texturas que varían de moderadamente gruesas (franco arenosas) a finas (arcillosas). El pH que soporta varía de 5.6 (medianamente ácido) a 8.4 (moderadamente alcalino), siendo óptimo un pH de 5.6 a 6.5.

4. Estadios fenológicos

El maíz es una planta de ciclo variado, existiendo genotipos extremadamente precoces cuya polinización puede ocurrir 30 días después de la emergencia, hasta aquellas cuyo ciclo completo puede alcanzar 120-150 días.

De forma general el ciclo del cultivo comprende estadios vegetativos y reproductivos con las siguientes etapas de desarrollo:

- Germinación y emergencia: periodo comprendido desde la siembra hasta el apareamiento de la plántula, el cual está en función de la temperatura y humedad del suelo y puede durar de 5 a 12 días.
- Crecimiento vegetativo: Período comprendido entre la emisión de la segunda hoja e inicio de la floración.
- Floración: Período comprendido entre el inicio de la polinización e inicio de la fructificación, cuya duración raramente pasa de los 10 días.
- Fructificación: Período comprendido desde la fecundación hasta el hinchamiento completo de los granos su duración estimada es de 40 a 60 días.
- Madurez: Período comprendido entre el final de la fructificación y el apareamiento de la capa negra en las mazorcas, siendo este relativamente corto e indica el final del ciclo de vida de la planta.

5. Principales enfermedades y plagas

Al maíz lo atacan más de 36 especie de insectos algunos son de suma importancia por la frecuencia con que inciden y por la gravedad de los daños, de las cuales la palomilla y los virus son causantes de serias pérdidas en la producción de maíz, siendo mayores las poblaciones en el período de lluvias. Entre las plagas más comunes están:

- Palomilla: *Spodoptera frugiperda*.
- Gusano de la mazorca: *Heliothis Zea*.
- Borer: *Diatraea sp.*
- Salta hoja: *Peregrinnus maydis*.

De las enfermedades las más comunes son:

- Pudrición de la mazorca: *Diplodia Zeae*.
- Pudrición de la mazorca: *Fusarium sp.*
- Mancha de la hoja: *Helminthosporium maydis* y *Turcicum*.
- Roya del maíz: *Puccinia sorgui*.
- Mosaico del enanismo: Virus.
- Mosaico del enanismo rayado: Virus.
- Achaparramiento: Virus.

6. Técnicas de cultivo

6.1. Preparación del suelo

La preparación del suelo debe garantizar un suelo profundo con una capa mullida de 25 cm. Si se hace mecanizada utilizar preferentemente el multirado y el tiller. La preparación con tracción animal puede utilizarse el arado de vertedera y gradas de pincho. El tiempo entre las labores debe permitir que se descompongan los restos de la cosecha anterior.

La profundidad de siembra adecuada es en general de unos 5 a 7 cm, pero puede ser de hasta 10 cm cuando la semilla es grande y sana.

6.2. Marcos de plantación

La siembra se realizará a distancia de camellón de 0.70 a 0.90 m y entre planta de 0.30 m. La cantidad de semilla para una hectárea es de 18 a 20 kg.

6.3. Tecnología de fertilización

El maíz demanda $100 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, $90 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de P y $80 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de K. Se realiza en fertilizaciones de fondo, aunque en dependencia de las variedades puede fraccionarse el nitrógeno.

6.4. Tecnología de propagación y plantación

Se propaga a través de semillas botánicas (granos), colocando por nido de 2-3 semillas, pudiendo ser de forma manual o mecanizada.

6.5. Sistema de riego

Pueden utilizarse diferentes sistemas de riego, los cuales deben garantizar una humedad que debe estar entre el 60 y 70% de la capacidad de campo durante todo el ciclo.

6.6. Tecnología de cosecha

La cosecha puede ser manual o mecanizada, generalmente se hace manual cuando el grano tenga entre el 20-25% de humedad de (108-145) días según la época de siembra y la variedad.

En maíz, la cosecha se puede iniciar tan pronto como los granos en desarrollo se acerquen a la madurez fisiológica que a menudo es cuando los granos tengan un rango de 30–35% de humedad. A la madurez fisiológica, las semillas han desarrollado una completa madurez funcional y expresan su máximo potencial de calidad. Las semillas de maíz típicamente llegan a su madurez fisiológica varias semanas antes de la madurez del campo, sin embargo, el contenido de humedad de la semilla es muy alto para permitir la cosecha y manejo mecánico. Así mismo el costo de secado a menudo es excesivo si la cosecha se hace en este estado. Cosecha de los granos en mazorcas con tantas brácteas como sea posible es lo deseable para reducir posibilidades de daño mecánico (Alvarez et al., 2006).

En el manejo de post-cosecha está el secado, desgrane, clasificación, limpieza, tratamiento y almacenamiento; el secado se iniciará antes de las 24 horas de haberse cosechado rebajando la humedad hasta un 18%.

7. Estudio económico

La sostenibilidad económica es uno de los factores clave para el desarrollo efectivo de los cultivos energéticos como son los residuos del maíz. Es indudable que será necesario que los agricultores encuentren suficiente estímulo económico en los nuevos usos energéticos para que realmente se produzca un desarrollo significativo y exista una amplia

oferta de biomasa en sus distintas formas para tal fin. Los costes de producción y los márgenes netos son los mejores indicadores económicos que podemos utilizar en la comparación de cultivos alimentarios tradicionales y las nuevas opciones energéticas que se le ofrecen a los agricultores actualmente (Kumar et al., 2008; Patel y Gami, 2012).

En la estructura de costes de producción de los cultivos de biomasa, la parte más significativa es la recolección (30% del coste total en biomasa, frente a 15% en cultivos alimentarios) y transporte de la biomasa, siendo este aspecto, por tanto clave en su manejo para obtener una buena rentabilidad para estos cultivos (Liu et al., 2011).

8. Características energéticas de los residuos del Maíz

Los residuos de maíz (Tallos, hojas, bracteadas de las mazorcas y tusas) son considerados como biomasa lignocelulósica, la cual está compuesta generalmente de celulosa, hemicelulosa y lignina (Quesada et al., 2014), que pueden generar calor y electricidad, pero además se ha comprobado que estas sustancias pueden convertirse en azúcares para producir bioetanol, y también por la tecnología del biogas puede obtenerse este biocombustible, no compitiendo con la producción de granos para consumo humano y animal (Martínez et al., 2014 y González et al., 2015).

Varios autores exponen que por cada kg de producto se pueden generar 2-5.0 kg de residuos en este cultivo, si obtenemos un rendimiento de granos de 4.5 t·ha⁻¹ se pueden generar entre 9 a 22.5 t·ha⁻¹ de residuos (3.5-8.6 t·ha⁻¹ de materia seca), Estos residuos poseen un valor energético de 18.4 MJ·kg⁻¹ de materia seca (PCS) y 17.1 MJ·kg⁻¹ de materia seca (PCI), por lo que el valor energético de estos residuos alcanzaría hasta los 161.92 GJ/ha, teniendo un balance energético favorable para su utilización con este fin (Martínez, 2014).

9. Conclusiones

El desarrollo de la biomasa del maíz para energía pasa por un conocimiento profundo de sus balances energéticos donde se puede generar hasta 161.92 GJ·ha⁻¹ y una exigencia de eficiencias energéticas significativamente positivas, teniendo en cuenta que la fase de la recolección y transporte de los residuos son los puntos de mayor consumo e inversión.

Referencias

Alvarez, C.G.D., Pinho, R.G., Borges, I.D. (2006). Avaliação de características agronômicas e de produção de forragens e grãos de milho em diferentes densidades de semeadura e espaçamentos entre linhas. *Ciência e Agrotecnologia, Lavras*, 30, p. 402-408. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542006000300003>

- González-Sánchez, M.E., Pérez-Fabiel, S., Wong-Villarreal, A., Bello-Mendoza, R., Yañez-Ocampo, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia, *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3):229-235. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.05.003>
- Kumar, A., Wang, L., Dzenis, Y.A., Jones, D.D., Hanna, M.A. (2008). Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock. *Biomass & Bioenergy*, 32(5), 460-467. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.11.004>
- Liu, G., Larson, E.D., Williams, R.H., Kreutz, T.G., Guo, X. (2011). Making Fischer-Tropsch fuels and electricity from coal and biomass: Performance and cost analysis. *Energy & Fuels*, 25, 415-437. <https://doi.org/10.1021/ef101184e>
- Martínez, P.E. (2014). Biomasa residual vegetal: tecnologías. *Innovaciencia*, 2(1), 45-52. <https://doi.org/10.15649/2346075X.255>
- Martínez-Hernández, C.M., Oechsner, H., Brulé, M., Marañón-Maison, E. (2014). Estudio de algunas propiedades físico-mecánicas y químicas de residuos orgánicos a utilizar en la producción de biogás en Cuba. *Rev. Cie. Téc. Agr.*, 23(2):63-69.
- Patel, B., Gami, B. (2012). Biomass Characterization and its use as solid fuel for combustión. *Iranian Journal of Energy and Environment*, 3(2), 123-128. <https://doi.org/10.5829/idosi.ijee.2012.03.02.0071>
- Permuy, N. (2005). Guía técnica para la producción del cultivo del maíz. Cuba Literaria. <http://www.cubaliteraria.com>. Consulta: Diciembre 15 del 2018.
- Quesada, J., Faba, L., Díaz, E., Ordóñez, S. (2014). La biomasa como alternativa al petróleo para la obtención de productos químicos: acetona y etanol como moléculas plataforma. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 5(2), 31-49.

Caña de azúcar en Cuba

**Juan Alejandro Villazón Gómez^{1*}, Ramón Candelario Núñez Tablada¹,
Roberto Alejandro García Reyes², Rolando Ramírez Olivera¹,
Vilma Anastasia López Cruz¹**

¹Centro de Estudios para Agroecosistemas Áridos, Facultad de Ciencias Naturales y Agropecuarias, Universidad de Holguín (Sede José de La Luz y Caballero). Ave. de Los Libertadores, km 3½, No. 287, Holguín, Cuba.

²Departamento de Ciencias Agropecuarias, Facultad de Ciencias Naturales y Agropecuarias, Universidad de Holguín (Sede José de La Luz y Caballero). Ave. de Los Libertadores, km 3½, No. 287, Holguín, Cuba.

*Autor para correspondencia: villazon@uho.edu.cu

1. Descripción

1.1. Características generales

La caña de azúcar, (*Saccharum* spp. L.), es una poacea originaria de Nueva Guinea, cultivada por primera vez en el Sureste Asiático y la India occidental. Desde el siglo IV A.C. era un cultivo importante en el subcontinente indio (Figura 1). Fue introducido en Egipto durante el siglo VII D.C. y unos de 100 años más tarde, fue llevada por los árabes a España (alrededor del 755 D.C.).



Figura 1. Plantación de caña de azúcar.

A partir de esa fecha, el cultivo de la caña de azúcar se extendió a casi todas las regiones tropicales y sub-tropicales. En los viajes de Cristóbal Colón a América la trasladaron, desde el archipiélago de Las Canarias, a las islas del Caribe (llegó a Cuba, desde La Española, en el año 1514) y de ahí pasó a la parte continental americana, particularmente a la zona tropical. Instalándose posteriormente los primeros ingenios azucareros en las partes cálidas del continente como parte de la colonización.

1.1.1. Sistema radicular

Constituye el anclaje para las plantas y posibilita la absorción de nutrientes y agua procedente del suelo. Está formado por dos tipos de raíces:

Primordiales.- Se originan a partir de la banda de primordios radical que se localiza en el anillo de crecimiento del trozo original que se planta. Son muy delgadas y ramificadas y duran hasta que aparecen las raíces en los brotes nuevos, a los 2-3 meses.

Permanentes.- Nacen de los anillos de crecimiento radical de los brotes nuevos. Son numerosas, gruesas y de crecimiento rápido, aparejado al desarrollo vegetativo de la planta.

La distribución de las raíces es fundamental para la fisiología de la planta. Se pueden clasificar en: absorbentes o superficiales, de anclaje o sostén y profundas. Las primeras predominan en los 60 cm más cercanos a la superficie del suelo y pueden alcanzar hasta 2 m de longitud en su crecimiento horizontal.

1.1.2. Tallos

Es el órgano de más importancia de la caña de azúcar, por ser la parte de la planta donde se acumulan los azúcares. La longitud depende ampliamente de las características ambientales del lugar y de la variedad que se utilice y el manejo se realice. Los tallos se pueden clasificar de la siguiente manera: primarios, secundarios o terciarios.

Nudos

Es la parte más dura y fibrosa de la planta y separa los entrenudos en el tallo. Está formado por el anillo de crecimiento, la banda o franja de raíces, la cicatriz de la hoja, el nudo debidamente dicho la yema y el anillo ceroso. Layema y su pubescencia son diferentes morfológicamente en cada variedad y por tanto muy usadas para su reconocimiento.

Entrenudos

Es la parte del tallo que se encuentra entre dos nudos. El grosor, el color, el aspecto y la extensión cambian en dependencia de la variedad. El color es ordenado por causas de carácter genético, esta expresión se puede dar por condiciones fundamentalmente del ambiente. Su apariencia más común puede ser de forma cilíndrica, abarrilada, constreñida, coneiforme y curvada.

1.1.3. Hojas

Esta parte de la planta se forma en los nudos y se reparte de forma alterna en el tallo a lo largo de su extensión. Cada una de las hojas están formadas por la lámina foliar, por la yagua y la vaina. Cuando se la fusión de estas dos partes se le da el nombre de lígula, la cual posee en su extremo una aurícula que desarrolla una variable pubescencia.

1.1.4. Flores

La inflorescencia de la planta tiene forma de panícula lisa alargada y en espiga. Estas espigas puestas sobre un raquis a lo largo poseen un tipo de flor hermafrodita compuesta por una tripleta de anteras y solo un ovario con un par de estigmas. Se encuentran circundadas por pubescencias muy extensas dándole una imagen lisa a la inflorescencia. La floración depende de la temperatura, la cantidad de agua disponible, la cantidad de nutrientes, el fotoperiodo y las condiciones ambientales son óptimas.

2. Distribución

En el mundo, los países productores de caña de azúcar están ubicados entre los 36.7° de latitud N y 31.0° de latitud S, en las franjas tropicales y subtropicales de nuestro planeta.

3. Exigencias del cultivo

3.1. Precipitaciones

Para producir 1 t de caña de azúcar, el cultivo consume entre 50-100 m³ de agua, por lo que el régimen de lluvias debe encontrarse cercano a los 1500 mm anuales para lograr un acelerado crecimiento vegetativo de los tallos. En sentido contrario, durante la maduración se requiere un ambiente más bien seco, pues las precipitaciones intensas disminuyen significativamente la calidad del jugo, propicia mayor crecimiento vegetativo, aumenta la humedad en el tejido vegetal y dificulta la cosecha mecanizada del cultivo.

3.2. Temperatura

La temperatura constituye, después de las condiciones de humedad del suelo, el factor que más influye sobre el desarrollo del cultivo. La germinación de la planta o el rebrote de los retoños se afecta cuando la temperatura se encuentra por debajo de 25 °C o por encima de 38 °C. Las altas temperaturas disminuyen la tasa fotosintética e incrementan la respiración, en detrimento de la producción de materia seca. Durante la maduración se altera la concentración de sacarosa, al convertirse la misma en fructuosa y glucosa, lo que disminuye la acumulación de los azúcares. El rango óptimo de temperatura se encuentra entre los 26-30 °C. La temperatura óptima en la hoja de la caña de azúcar para la formación de sacarosa debe ser oscilar alrededor de 34 °C, para favorecer la tasa fotosintética. Si la temperatura media es menor a 21 °C, aumenta la concentración de sacarosa, pero retarda el crecimiento de los tallos, lo cual también ocurre si la oscilación entre las temperaturas medias diurnas y nocturnas es mayor a 8 °C.

3.3. Radiación solar

Con independencia del comportamiento de las temperaturas, las hojas superiores interceptan más del 70% de la radiación solar, por lo que el sombreado que producen sobre las hojas inferiores hace que disminuya su producción de fotosintatos. Una apropiada regulación de la densidad de población favorece una mayor intercepción de la radiación solar

lo que, al mantener por más tiempo las hojas verdes en la planta y al prolongar su actividad fotosintética, propicia una adecuada acumulación de azúcares.

3.4. Factores edáficos limitativos

La existencia de factores edáficos limitativos es uno de los aspectos que tiene mayor incidencia negativa en la producción de caña de azúcar. Por otra parte, se plantea que el crecimiento de las plantas depende de una combinación favorable de factores y cualquiera de ellos, desequilibrado respecto a los otros puede reducirlo o impedirlo. El factor menos favorable determinará el nivel de producción de las cosechas, por lo que cualquier factor que afecte el crecimiento de la raíz reduce la producción. En las plantaciones cañeras de Cuba se considera factor limitativo del suelo esencialmente al que reduce el crecimiento y productividad de la caña o conduce a su muerte. Pueden encontrarse factores limitativos como la poca profundidad del perfil del suelo, el contenido de piedras, la textura arenosa, la formación de concreciones y laterización, el agrietamiento y endurecimiento de suelos montmorilloníticos, salinización, régimen de agua no favorable, deficitario y muy variable, desarrollo de hidromorfismo, etc.

4. Estadios fenológicos

El cultivo de caña de azúcar presenta un desarrollo vegetativo en el cual la duración de las etapas es variable, al depender de la variedad, de la cepa y de la influencia de los factores climáticos. Desde la siembra hasta la cosecha media un período que oscila entre 12 y 18 meses. Durante este tiempo el cultivo presenta cuatro etapas: germinación, ahijamiento, rápido crecimiento y maduración. En tanto, el desarrollo de los retoños (a partir del segundo corte de la cepa de caña de azúcar) tiene una duración de 11 a 13 meses durante los que se distinguen tres etapas: brotación y amacollamiento, rápido crecimiento y maduración.

5. Plagas y enfermedades

5.1. Insectos perjudiciales

En Cuba están reportadas hasta el presente 103 especies de insectos perjudiciales a la caña de azúcar, y el mayor peligro está representado por los órdenes *Lepidóptera*, *Homóptera* y *Coleóptera*, aunque los roedores en ocasiones provocan daños de importancia considerable. El principal problema lo constituye el barrenador del tallo *Diatraea saccharalis* Fabricius, por su amplia distribución en el territorio, densidad poblacional y las pérdidas que ocasiona, que oscilan entre 90 000 y 120 000 t ha⁻¹ de azúcar. La mosca *Lixophaga diatraeae* Towns. y la avispa *Trichogramma fuentesi* Torre han sido los controladores biológicos más efectivos contra esta plaga. En la actualidad se aplica a menor escala el hongo entomopatógeno *Beauveria bassiana* (Bals.-Criv.) Vuill, y recientemente se ha introducido el bracónido *Cotesia flavipes* Cam. En la actualidad *Leucania* spp. Es una de las plagas principales de la caña de azúcar y la especie *Leucania unipuncta* es la más representativa, ha llegado a constituir entre el 60 y el 85 por ciento de los ataques en la región central del país, y el 95

por ciento en la región occidental. El control biológico se realiza sobre la especie *Leucania unipuncta* y se lleva a cabo fundamentalmente con el braconídeo *Apanteles* spp., que se puede liberar en estado adulto o de pupa para lo que se seleccionan tres o cinco puntos tomados al azar en una hectárea.

Los daños por *Mocis* sp. se presentan en todas las zonas donde se cultiva la caña de azúcar. Ataques muy fuertes se han manifestado en las provincias Camaguey, Ciego de Ávila y Cienfuegos. De las cuatro especies presentes en Cuba, *Mocis latipes* es la que frecuentemente ocasiona daños al cultivo. El control biológico de esta plaga se recomienda como una medida preventiva efectiva en áreas colindantes con las atacadas por la plaga, y se lleva a cabo utilizando el parasitoide de huevos *Trichogramma*. Tres especies son idóneas para el control de *Mochis*: *Trichogramma pinto* Voegelé, *Trichogramma pretiosum* Riley y *Trichogramma rojasi* Nagaraja y Nagarkatti, con una norma de liberación de 500 individuos por hectárea. Igualmente se recomienda su aplicación como una medida curativa en áreas cañeras afectadas en dosis de 30 mil individuos por hectárea.

5.2. Enfermedades

En Cuba se han reportado alrededor de 57 enfermedades. Las más importantes son el carbón, el raquitismo de los retoños y la roya, sin embargo se destacan la escaldadura foliar y el Síndrome del Amarilleamiento Foliar.

- Carbón de la caña de azúcar (*Ustilago scitaminea*, Sydow). Las variedades de reacción resistente se pueden plantar en cualquier época del año y de forma que contribuyan a detener el avance de la epifitotia, es decir, en una zona de alta incidencia protegiendo las áreas de semilla y como barreras adyacentes a las variedades susceptibles. La plantación de variedades susceptibles se debe evitar, no sólo por las pérdidas que provoca la enfermedad, sino por la elevación de los niveles de inóculos que a corto plazo disminuyen la resistencia de las variedades intermedias, y a largo plazo incluso la de las variedades más resistentes. Las variedades de reacción intermedia tienen una resistencia aceptable en zonas con bajo nivel de inóculos o cuando se plantan en zonas donde las condiciones edafoclimáticas no favorezcan el desarrollo de la enfermedad, que en Cuba están ubicadas del centro hacia el norte del país; deben recibir una protección sanitaria rigurosa y se deberán cumplir cabalmente las labores de inspección, saneamiento y en casos necesarios demoliciones.
- Raquitismo de los retoños (*Leifsonia xily*, sub *xily*).- El empleo de material de siembra sano, es la medida principal de control del raquitismo de los retoños (RSD), y este objetivo se puede lograr mediante la producción de semilla certificada a partir de tallos vigorosos tratados con agua caliente (hidrotermoterapia), aire caliente o vapor aireado, aunque los mejores resultados se han logrado con el primer método. La inactivación total del organismo causal no se logra con el primer tratamiento de hidrotermoterapia que se aplica a la semilla, por lo que para controlar esta enfermedad es necesario que la semilla comercial haya recibido como mínimo tres tratamientos sucesivos, (en el banco de donantes, el banco de semilla básica y el centro de semilla registrada), además de aplicar las demás medidas de control antes indicadas.

- Roya (*Puccinia melanocephala* (Sydow y P. Sydow).-El empleo de variedades resistentes es la vía más segura para el control de la roya. Se ha determinado que el carácter de resistencia a roya es dominante, y por consiguiente no es difícil en extremo obtener variedades con buenas características agroproductivas y resistentes a esta enfermedad (Alfonso,1987). En otros países se han utilizado métodos agronómicos para disminuir el nivel de infección, ya que el empleo de buenas prácticas culturales reduce la incidencia de roya. Desde el punto de vista biológico, a pesar de haberse reportado un grupo de hiperparásitos del organismo causal de la enfermedad, no se conocen aún medidas efectivas de control biológico.
- Escaldadura foliar (*Xanthomonas albilineans*, (Ashby) Dowson). El control más efectivo de la enfermedad se logra con el empleo de variedades resistentes, selección adecuada de la semilla, eliminación de material enfermo en los semilleros y desinfección de las herramientas utilizadas para el corte. Se han realizado ensayos para el control de la enfermedad con tratamientos de calor con microondas o agua caliente con diferentes temperaturas y tiempos de exposición. En Cuba para el caso de yemas aisladas el tratamiento más eficiente ha resultado la inmersión de la semilla durante 48 horas en agua fría, y a continuación agua caliente a 51 °C una hora.
- Síndrome del Amarilleamiento Foliar (YLS).-Desde su aparición en el continente africano se han reportado diferentes causas de la enfermedad: presencia de luteovirus, fitoplasmas y diferentes condiciones estresantes. En Cuba las investigaciones han demostrado la asociación del amarillamiento foliar con fitoplasmas.

6. Técnicas del cultivo

6.1. Preparación de la tierra

Las formas en que hoy se prepara el suelo comprenden tres tecnologías básicas: laboreo total con inversión del prisma (realizado con equipos tradicionales y sus diferentes combinaciones, arados y gradas de discos); laboreo total sin inversión del prisma (contempla la utilización de arados de cincel o subsoladores con saeta de corte horizontal, que fragmentan el suelo sin realizar movimientos en ningún sentido) y laboreo localizado, mecánico o químico (limitado a la zona donde se desarrolla el sistema radical, dejando el resto del área para procesarla durante el cultivo).

6.2. Siembra

En Cuba se conocen tres épocas principales de plantación:

- *Enero a abril o siembras de medio tiempo.* En zonas con riego para garantizar la brotación y el establecimiento de la plantación. Se puede realizar también a partir del mes de marzo, empleando cachaza fresca para tapar la semilla, en dosis de 30-50 t ha⁻¹. La cachaza, además de garantizar la humedad necesaria para la brotación, suministra el nitrógeno y el fósforo para todo el ciclo y contiene sustancias que estimulan la brotación de las yemas.

- *Primavera*. Se ejecutan desde mediados de abril hasta finales de junio. Es la época de plantación predominante. En ésta época se han producido las pérdidas más altas (alrededor del 20% del área plantada en los últimos 15 años), entre otras causas por el uso de semilla con alto contenido de sacarosa y lignina, sobrehumedecimiento en áreas de drenaje deficiente y enyerbamiento excesivo.
- *Frío*. Son las que se realizan entre julio y diciembre (fríos tempranos de julio a septiembre). Los productores y técnicos azucareros coinciden con Álvaro Reynoso en que es la época óptima de siembra para la mayor parte de las áreas cañeras de Cuba, excepto en suelos plásticos pesados de drenaje deficiente, donde es muy difícil la preparación de las tierras. Las ventajas principales de esta época son que se emplea semilla de más calidad, se pueden atender mejor las nuevas plantaciones, se puede usar un cultivo precedente en rotación, es posible sembrar un cultivo intercalado y sufren menos con la sequía que las de primavera. Tienen el inconveniente señalado de los suelos pesados y, además, se corre el riesgo de no poder culminar la preparación en los breves lapsos sin precipitaciones que tienen lugar en julio o septiembre en la mayor parte del territorio nacional.

6.3. Fertilización

El nitrógeno es el nutriente que más influye en el rendimiento agrícola y el más utilizado en la caña de azúcar. Como promedio se emplean entre 1.0 y 1.5 kg de nitrógeno (N) por tonelada de caña (Tabla 1).

Tabla 1. Recomendaciones de fertilización nitrogenada para la caña de azúcar, en dependencia del rendimiento esperado, la cepa y las características de los suelos.

Rendimiento esperado (t ha ⁻¹)	Plantas		Retoños	
	Condición 1	Condición 2	Condición 1	Condición 2
	Dosis de N (kg ha ⁻¹)			
Menos de 25	40		50	40
25-40	50			50
34-50	60		70	60
42-70	70	0	80	70
59-90	80		90	80
76-110				90
93-130	90		100	100

Condición 1: Suelos con limitaciones (hidromorfía y compactación).

Condición 2: Suelos sin limitaciones.

El fósforo total de los suelos cubanos varía entre 4.8-7.0 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Las reservas mayores corresponden a los suelos Ferralitizados y las menores a los Sialitizados y Vertisuelos (Tabla 2).

Tabla 2. Recomendaciones de fertilización fosfórica para la caña de azúcar, en dependencia del contenido de fósforo asimilable y el pH del suelo.

Categoría	P asimilable por Oniani	Dosis	
		Intervalo	Media del intervalo
Para valores de pH en agua £ 5.0			
	mg P ₂ O ₅ /100 g	kg P ₂ O ₅ /ha	
Muy alto	³ 22.0	0	0
Alto	³ 12.3 a<22.0	0 a 15	7.5
Medio	³ 6.4 a<12.3	15 a 35	25
Bajo	³ 3.0 a<6.4	35 a 55	45
Muy bajo	<3.0	> 55	60
Para valores de pH en agua >5.0			
Muy alto	³ 44.0	0	0
Alto	³ 3.6 a<44.0	0 a 30	15
Medio	<3.6	30	30
Bajo y muy bajo	Trazas	50	50

Los suelos de formación ferralítica son en general pobres en potasio total (0.08-0.20%), mientras los Vertisuelos y Sialitizados son más ricos (entre 0.40-2.30%). En todos ellos sólo una pequeña porción del total (menos del 15%) está disponible para las plantas. Entre 1.5 y 2.0 kilogramos de potasio (K₂O) por tonelada de caña salen del campo con la cosecha (Tabla 3).

Tabla 3. Recomendaciones de fertilización potásica para la caña de azúcar, en dependencia del contenido de potasio asimilable el rendimiento esperado y la cepa.

Categoría	K asimilable (mg/100g)	Rendimiento esperado (t ha ⁻¹)		
		< 50	50 a 100	> 100
Dosis de K ₂ O /ha				
Cepas de caña planta				
Alto	> 30	0	0	0
Medio	20 a 30	0	0	0
Bajo	10 a 20	60	60 a 80	80
Muy bajo	< 10	80	100 a 120	120
Cepas de retoños				
Alto	> 30	0	0	0
Medio	20 a 30	60	60 a 80	80
Bajo	10 a 20	100	100 a 120	120
Muy bajo	< 10	120	120 a 150	150

6.4. Riego

Los bajos contenidos de materia orgánica en el suelo impiden una adecuada acumulación de agua aprovechable para el cultivo de la caña de azúcar. Cuando se cuenta con riego, es fundamental saber aplicar las láminas de agua en cantidad, frecuencia y oportunidad. Cuando no se tiene manera de tener un abasto controlado de agua, se afecta de manera negativa el rendimiento y producción de azúcar, aunque es importante mencionar que el estrés hídrico moderado durante la maduración del cultivo (entre 1-1.5 meses antes de la cosecha) retarda la floración y aumenta la producción. Los riegos o lluvia excesiva durante la etapa vegetativa causan problemas en la plantación, porque disminuye la tasa de difusión del oxígeno y afectan la absorción de nutrientes.

6.5. Cosecha

En Cuba se ha introducido un sistema de cosecha en verde con un alto grado de mecanización, independientemente de las mejoras que pueden incluirse, ha traído innumerables ventajas al proceso productivo de la caña de azúcar. Sin embargo, por cada tonelada de caña que se procesa se extraen como promedio 80 kilogramos de residuos. De los esquemas mecanizados, el *corte mecanizado con corta cogollo y tiro a basculador*, resulta el de menor costo por tonelada de caña. Constituye un paso importante en el perfeccionamiento del sistema cubano de cosecha y ha sido la motivación para el desarrollo de las nuevas combinadas con desmenuzadores de cogollo. Con el uso del corta cogollo, la caña limpia se incrementa en 5%. Se reduce significativamente el porcentaje de cogollos entre 3-5%, lo cual representa una eficiencia de 45-50% en campos con rendimientos de 50 t ha⁻¹.

7. Estudio económico del cultivo

En la industria azucarera se estima un potencial instalado de 478.5 MW. A nivel país, se calcula una capacidad de cogeneración de 1 250 MW, radicados en dicho sector. Se realizan importantes esfuerzos para aumentar el aporte de las unidades azucareras a la generación de electricidad. En un futuro, las instalaciones podrían abastecerse totalmente en generación de electricidad. Numerosos centrales azucareros están actualmente conectados al sistema electro-energético nacional.

8. Características energéticas del cultivo

La biomasa aprovechable energéticamente es el bagazo y los residuos agrícolas cañeros (RAC). El bagazo representa el 30% de los tallos verdes molidos y es el residuo fibroso de este proceso, se obtiene con un 50% de humedad, esto significa que por cada hectárea cosechada es posible obtener anualmente 13.5 t de bagazo equivalentes a 2.7 tce (t de combustible equivalente 37.5 MJ kg⁻¹).

Cuatro toneladas de paja equivalen a una tonelada de petróleo (calor de combustión de la paja con 30% de humedad: 11.7 MJ kg⁻¹) (Reyes y Betancourt, 2003). El valor calórico

del bagazo (50% humedad) es de 7.64 MJ kg⁻¹, semejante al de la madera: 7.9 MJ kg⁻¹ (Reyes y Betancourt, 2003).

9. Conclusiones

El bagazo y los residuos agrícolas cañeros constituyen la biomasa aprovechable energéticamente del cultivo de la caña de azúcar. El valor calórico de primero es de 7.64 MJ kg⁻¹; mientras que 4 t de paja equivalen a 1 t de petróleo, con un calor de combustión de 11.7 MJ kg⁻¹.

Referencias

- Aguilar Pardo, A., Aguilar Estrada, D. (2017). Nuevos paradigmas en la cosecha de la caña para el uso sustentable de la biomasa en la bioeléctrica. Parte II. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 51(1), 8-15.
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. (2015). *Ficha técnica del cultivo de la caña de azúcar (Saccharum officinarum, L.)*. Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y alimentación. México, D. F., 19 pp.
- Cuéllar, I., de León, M., Gómez, A., Piñón, D., Villegas, R., Santana, I. (2003). *Caña de azúcar. Paradigma de sostenibilidad*. Ediciones Publinica. La Habana, 175 pp.
- Cuéllar, I., Villegas, R., de León, M., Pérez, H. (2002). *Manual de fertilización de la caña de azúcar en Cuba*. Ediciones Publinica. La Habana, 127 pp.
- Hernández Sardiñas, A., González Morales, V.M. Freide Orozco, M.L. (2017). Aprovechamiento de las posibles fuentes de biomasa para entregar más electricidad en la fábrica de azúcar Antonio Sánchez. *Centro Azúcar*, 44(4): 88-97.
- INICA. (1990). *Normas Metodológicas del Departamento de Suelos y Agroquímica*. Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar. La Habana. 203 p.
- Pineda Ruiz, E.B. 2002. *Factores asociados con la respuesta de la caña de azúcar a los fertilizantes minerales*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Agrícolas. 99 pp.
- Reyes, J., Betancourt, J. (2003). *La biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental.*, Centro de Estudios de Termoenergética Azucarera, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2003, pp. 2-9.

Marabú en Cuba

Ramón Candelario Núñez Tablada*, Rolando Ramírez Olivera, Roberto Gracia, Juan Alejandro Villazón Gómez, Vilma Anastasia López Cruz

Centro de Estudio para Agroecosistemas Áridos, Facultad de Ciencias Naturales y Agropecuarias, Universidad de Holguín. Cuba.

*Autor para correspondencia: munez@uho.edu.cu

1. Descripción

Nombre Científico: *Dichrostachys cinerea*

Reino: Plantae

División: *Magnoliophyta*

Clase: *Magnoliopsida*

Subclase: *Rosidae*

Orden: *Fabaceae*

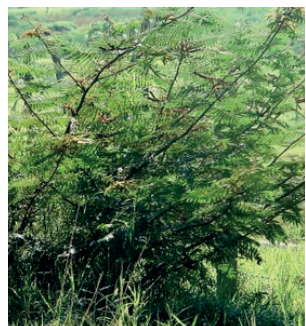
Familia: *Fabaceae*

Género: *Dichrostachys*

Especie: *Dichrostachys cinerea*

Nombres comunes en Cuba: marabú, aroma, aroma francesa, aroma blanca, espina del diablo, weyler (Bassler, 1998).

El Marabú (*Dichrostachys cinerea*) es un arbusto con ramas espinosas, de la familia *Mimosaceae*, nunca crece aislado sino formando masas compactas impenetrables y



alcanza más 4-5 m de altura. Sus troncos son bastante tortuosos, con numerosas ramificaciones gruesas y finas, muy espinosas que suelen formar entramados impenetrables.

Ocupa gran cantidad de espacio en los pastizales y áreas forrajeras, que determinan una disminución del número de animales por área.

La especie que nos ocupa se conoce científicamente como *Dychrostachys cinerea* (L.) Wight & Arn., especie nativa de África, la India, Sur de Tailandia y Malasia, así como de algunos territorios situados al Norte de Australia (aún se discute si en este último lugar fue introducida por el hombre). Son plantas de morfología sumamente variable, lo que ha motivado que se distingan nueve subespecies y trece variedades, de las cuales, sólo *D. cinerea* (L.) Wight & Arn. ssp. *africana* Brenan & Brummitt var *africana* está representada en Cuba.

El tallo y la semilla se usan para la fabricación de variados objetos decorativos y artesanales. La corteza y los frutos poseen propiedades antisépticas y astringentes, dado su alto contenido de taninos. La corteza es gris, pardo grisácea o blanquecina y las espinas solitarias, gruesas y punzantes, de 1 a 2.5 cm de largo.

El sistema radicular desarrollado y profundo garantiza al marabú resistencia a sequías prolongadas, subsistencia al corte o a la quema y capacidad para retoñar profusamente pasadas esas adversidades. Otros atributos anátomo-morfológicos tan particulares como el significativo endurecimiento de los tallos, las abundantes espinas y la emisión de numerosos pies de plantas por unidad de área, entorpecen considerablemente las labores de control.

La madera, duradera y resistente, tiene amplia utilización en postes de cercas, horcones de construcciones rústicas, bastones y otros objetos de ebanistería. Clasificada como muy pesada y de alta densidad (1.11 g/cm³ con 15 % de humedad), es de textura fina y grano recto, por lo que se considera que, convertida en virutas, puede constituir una materia prima adecuada para fabricar tableros de madera prensada y diferentes tipos de hormigones ligeros. Suministra también una excelente pulpa para papel.

2. Distribución

La variedad habita en tres continentes, pero quizá lo más significativo resulte ser el hecho de que en ningún otro lugar constituye una plaga vegetal como lo es en el archipiélago cubano. Su más amplia distribución geográfica se aprecia en África, al reportarse en países con costas al Atlántico (Angola, Cabo Verde, Camerún, Congo, Gambia, Ghana, Senegal, Sierra Leona, Togo, Nigeria), del centro del continente (Burundi, Rwanda, Uganda), del Centro-Este (Sudán, Eritrea, Etiopía, Kenia), del Norte (Egipto), del Sureste (Islas Comores, Mozambique, Tanzania, Zambia), y del Sur (Sudáfrica, Swazilandia, Zimbabwe). Crece también en Asia (Pakistán), y fue introducida por la actividad humana en América (Estados Unidos y Cuba).

3. Exigencias ecológicas del cultivo

En Cuba puede encontrarse en alturas superiores a los 800 msnm, pero también en elevaciones muy superiores en otras regiones. Como las alturas contribuyen a otorgarle caracteres diferenciales a las variables que caracterizan ecológicamente a las zonas, indican

un destacado comportamiento adaptativo. Así, crece de manera exuberante desde niveles de precipitaciones menores que 800 mm hasta mayores de 2000 mm anuales, pero no tolera suelos de excesiva humedad y menos los inundados (Sistachs y León, 1988).

En lugares secos, el estrés hídrico provoca cambios en el crecimiento, reduciendo su talla para formar matorrales densos.

Se adapta y crece bien en suelos desde ligeros arenosos hasta arcillosos pesados, sin problemas con el pH que estos posean.

Prefiere las zonas de elevada luminosidad por lo que es especialmente adaptada a las regiones tropicales. Aguilera (2011) plantea que *D. cinerea* normalmente penetra zonas claras, alejadas de la selva. En Malasia se desarrolla en climas estacionales fuertes, generalmente en suelos pobres y ocasionalmente arcillosos. Los arbustos forman matorrales, setos y penetran con facilidad los espacios dejados por segmentos de bosques y en los pastizales.

4. Estadíos fenológicos

Arbusto o árbol pequeño, hasta 5 m de altura; ramas jóvenes vellosas, más tarde glabras; ramas con braquiblastos de 1-3 cm de largo, en pares, espinosos, en tamaño desigual y que tienen a menudo hojas e inflorescencias; estípulas sólo en las ramas jóvenes, más tarde caducas. Hojas compuestas, con 8-12 pares de pinnas; peciolo de 0.6-1, 1 cm de largo; raquis 4-6 cm de largo, vellosa, por lo general en la base de cada par de pinna una glándula pedunculada de 1-1.1 mm de largo, 0.3 mm de ancho; pinna con 10-26 pares de folíolos; folíolos lineales hasta oblongos, asimétricos, 3-5 mm de largo, 0.9-1.5 mm de ancho, ápice redondeado, haz algo nítidos, glabros, vellosos en el margen, envés glabros o con pelos aislados y nervadura algo prominente. Inflorescencias en espigas solitarias o en glómerulos axilares o en los braquiblastos espinosos, colgantes, amarillos arriba, blancuzcos hasta rosado claro en la parte de abajo que es más ancha. Flores superiores hermafroditas, amarillas; flores basales estériles, blancuzcas o rosado claro.

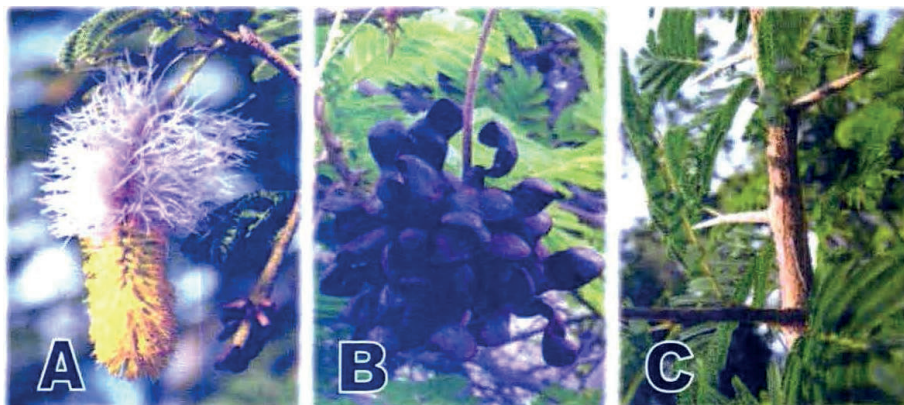


Figura 1. *Dichrostachys cinerea*. Detalles de la inflorescencia (A), frutos secos (B), ramas y follaje (C). Bassler, (1998).

Frutos (legumbres) en glómerulos, comprimidos, coriáceos, cuando jóvenes pubescentes, más tarde glabros, indehiscentes; valvas lineales, torcidas hasta enrolladas y retorcidas, onduladas, 8-13 mm de ancho, pardas oscuras. Semillas comprimidas, redondeadas hasta elípticas, 4-5 mm de largo, 3.5-4 mm de ancho, con un pleurograma del 75%, lisas, pardas.

5. Principales enfermedades y plagas

Esta se comporta como especie altamente invasora en lugares abiertos y soleados en Cuba. Esto se debe a que no tiene allí las plagas y enfermedades que frenan su desarrollo en sus lugares de origen. También se debe a su tolerancia a suelos diversos y a la sequía, a sus abundantes espinas, a la dureza de sus tallos, a la dispersión de semillas por el ganado y a la proliferación por retoños radicales formando tupidas espesuras.

6. Estudio económico

Cuando su diámetro sobrepasa los 5 o 6 cm, puede ser utilizado como poste rústico para los cercados, a un precio de \$1.00 el poste rústico y \$1.40 el poste aguzado. Este beneficio potencial existe en la zona e incluso ha sido utilizado para cercado dentro del área.

Con un grosor mayor de 18 centímetros, puede ser empleado como madera para carpintería, a un precio de \$160.00 el metro cúbico. Este grosor no es predominante en el área y como el objetivo no es mantener la especie, no tiene sentido pensar en ese uso como destino.

Su biomasa está reportada como apta para la gasificación y producción de carbón activado. De modo similar al beneficio potencial anterior, en este caso no tiene sentido promover el desarrollo del carbón activado en un terreno de marabú destinado a desaparecer.

Sus troncos pueden ser utilizados como excelente leña y carbón de alto grado calórico, con un precio oficial de 18.00 pesos el metros cúbicos de leña y 50.00 pesos el metro cubico de carbón. Este último producto es, incluso, comercializado en el exterior por las Empresas Nacional para la Protección de la Flora y la Fauna, por lo cual tiene una demanda potencial alta, susceptible de ser aprovechada para financiar la eliminación del marabú en el área objeto de estudio. Esta es la variante empleada en este caso.

Actualmente la maquina cosechadora de marabú está en funcionamiento y se han empezado a dar las primeras aportaciones de biomasas de marabú para la producción de energía en el central Agramonte, habiéndose aportado 78 TM.

7. Características energéticas de la madera

La biomasa forestal marabú (*Dichrostachys cinerea*) es un arbusto que cubre de forma silvestre un elevado número de hectáreas en Cuba que se explota con fines energéticos. La leña del marabú es de fácil combustión, produce una braza duradera y tiene un poder

calórico de 4 654 kcal/kg, semejante al de otras especies forestales utilizadas tradicionalmente en el país para producir energía, como es el caso de la yana (*Conocarpus erectous* L.) y de la casuarina (*Casuarina* sp.). La difícil situación económica por la que ha atravesado el país con posterioridad a la caída del bloque socialista europeo ha obligado a utilizarla ampliamente en múltiples renglones de la economía, y hace mucho tiempo que el carbón obtenido de ella tiene gran aceptación en las labores de cocina por la escasa producción de humo y cenizas, por lo cual altera poco el olor y sabor de los alimentos.

La biomasa se sometió a una caracterización química física, utilizando especificaciones técnicas del Comité Europeo para Estandarización (CEN), donde se le determinaron los principales puntos del proceso de pirólisis mediante análisis termo-gravimétrico para su posible utilización como fuente energética.

El estudio permitió demostrar que esta biomasa posee adecuadas características para su uso como fuente de energía, un poder calórico superior igual 19100 kJkg⁻¹, 3.4% de ceniza y una temperatura de fusión de 1460 °C, así como también bajos contenidos de cloro y azufre.

El análisis termo-gravimétrico permitió identificar dos zonas de reacción de pirolisis bien definidas: la zona activa, donde predomina la descomposición de la hemicelulosa y celulosa, y la pasiva marcada por la descomposición de la lignina; sin embargo ésta ocurre en un amplio rango de temperatura, menor velocidad de degradación y se sobrepone a la descomposición de los otros componentes. Además se observó una pérdida de peso del 60% para la primera zona.

Los valores de los resultados del análisis elemental e inmediato son similares a lo que reporta la literatura para otros materiales lignocelulósicos, residuos del maíz (Kumar *et al.*, 2008) y el bagazo de caña (de Souza-Santos, 2005), los cuales han sido ampliamente estudiados y utilizados en diferentes aplicaciones para su aprovechamiento energético.

Tabla 1. Análisis elemental del marabú, residuos de maíz y bagazo de caña. (% peso seco).

Componente	Marabú	Desv. St	Residuos maíz	Bagazo caña de azúcar
C	49,40	1,12	47,4	49,6
H	6,12	0,43	5,01	5,71
N	0,79	0,03	0,77	0,21
O	40,24	1,52	38,09	41,1
S	0,05	0,002	0,31	0,03

El porcentaje de ceniza es similar al del bagazo de caña e inferior al del residuo de maíz, con una temperatura de fusión de 1460 °C, lo que permite clasificarla como alta temperatura de fusión de acuerdo a estudio realizado para diferentes clases de biomazas (Corinaldesi, 2008). Este es un parámetro a tener en cuenta cuando se utiliza biomasa como materia prima en procesos termoquímicos por su influencia directa en la eficiencia energética y elevar los costos de mantenimientos, debido a las incrustaciones que se producen. Igualmente otro parámetro importante es el contenido de energía (poder calórico superior): para el marabú se determinó igual a 19100 kJkg⁻¹, con una desviación estándar de 140

kJkg⁻¹, algo superior al residuo de maíz (Kumar et al., 2008), bagazo de caña (de Souza-Santos, 2005) y al de cáscara de arroz (14420 – 18310 kJkg⁻¹) (Ghaly and Mansaray, 1997), por lo que se considera alto para esta clase de biomasa.

La leña del marabú es de fácil combustión, produce una braza duradera y tiene un poder calórico de 4654 kcal/kg, semejante al de otras especies forestales utilizadas tradicionalmente en el país para producir energía, como es el caso de la yana (*Conocarpus erectus* L.) y de la casuarina (*Casuarina* sp.). La difícil situación económica por la que ha atravesado el país con posterioridad a la caída del bloque socialista europeo ha obligado a utilizarla ampliamente en múltiples renglones de la economía, y hace mucho tiempo que el carbón obtenido de ella tiene gran aceptación en las labores de cocina por la escasa producción de humo y cenizas, por lo cual altera poco el olor y sabor de los alimentos.

8. Conclusiones

El marabú presenta características que sugieren su uso como materia prima para la conversión de energía por sus procesos termoquímicos, su alto poder calórico, su alta temperatura de fusión de las cenizas y por sus bajos porcentajes de azufre y cloro.

En Cuba el marabú biomasa del marabú se ha reportado como fuente de materia prima apta para la gasificación y para la producción de carbón activado.

Referencias

- Abreu, N.R. (2019). Caracterización genética del marabú. AIFET_Facoltà di Agraria. Università Politecnica delle Marche, Polo Montedago - Vía Breccia Bianche, 1 - 60131 Ancona. www.researchgate.net/publication/271203043_Caracterizacion_energetica_del_Marabu
- Aguilera, N. (2011). Impactos de las invasiones de plantas en las islas oceánicas: El caso de *Dichrostachys cinerea* (L.) Wight & Arn. Disponible en: https://www.ecoportal.net/temas-especiales/biodiversidad/impactos_de_las_invasiones_de_plantas_en_las_islas_oceanicas_el_caso_de_dichrostachys_cinerea_l_wight_arn/
- Bassler, M. (1998). *Mimosaceae. Flora de la República de Cuba*. Serie A, Plantas Vasculares. Fascículo 2 Koeltz Scientific Books, Koenigstein. 202 pp.
- Corinaldesi F. (2008). *Problematica dei depositi di cenere nella combustione delle biomasse: aspetti teorici e sperimentali*. Dottorato di Ricerca, Università Politecnica delle Marche.
- Ghaly, A.E., Mansaray, K.G. (1997). Physical and thermochemical properties of rice husk.. *Energy Sources*, 19, 989-1004. <https://doi.org/10.1080/00908319708908904>
- Kumar, A., Wang, L., Dzenis, Y.A., Jones, D.D., Hanna M.A. (2008). Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock. *Biomass and Bioenergy*, 32, 460–467. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.11.004>
- Rivera, J.L., Reyes, J.C., González, A., Palma, A.L. *Estación Experimental de Pastos y Forrajes*, MINAG, Las Tunas.
- Sistachs, M., León, J.J. (1988). Aroma y marabú (*Acacia farnesiana* L.) Wight and Arn y *Dichrostachys cinerea* (L.) Wight and Arn. Características y control.

Residuos del Arroz en Cuba

**Roberto Alejandro García-Reyes^{1*},
Ramón Candelario Núñez Tablada¹, Juan Alejandro Villazón Gómez²,
Rolando Ramírez Olivera²**

¹Departamento de Ciencia Agropecuarias, Facultad de Ciencias Naturales y Agropecuarias de la Universidad de Holguín, Sede José de la Luz y Caballero, Ave. de los Libertadores no. 287, Holguín, Cuba.

²Centro de Estudios para Agroecosistemas Áridos, Facultad de Ciencias Naturales y Agropecuarias de la Universidad de Holguín, Sede José de la Luz y Caballero, Ave. de los Libertadores no. 287, Holguín, Cuba.

*Autor para correspondencia: rmunez@uho.edu.cu

1. Características generales del cultivo

Es una planta herbácea anual que se cultiva en condiciones casi permanentes de inundación. Está formada por tallos rectos dispuestos en macolla, con raíces delgadas, fibrosas, cilíndricas y fasciculadas. La planta, provista de 7 a 11 hojas durante la fase vegetativa, alcanza una altura variable comprendida entre los 80 y los 150 centímetros, según la variedad y las condiciones ambientales de cultivo (Franquet, 2002).



Figura 1. Morfología de la planta del arroz.

1.1. Tallo

Corresponde a la estructura característica de las gramíneas. Su longitud va desde 30 cm en las variedades enanas hasta 70 cm en las gigantes. Las macollas son tallos secundarios que salen de las yemas apicales. El macollaje se inicia en el primer nudo.

1.2. Hojas

Son alternas y están dispuestas a lo largo del tallo. Está constituida por vaina, zona de unión y lámina.

1.3. Espiguillas

Están formadas por un pequeño eje llamado raquis, sobre el cual se encuentra una flor simple, formada por dos brácteas denominadas glumas estériles, dos brácteas superiores, llamadas glumas florales, que constituyen la caja floral.

1.4. Flor

Está constituida por seis estambres y un pistilo. Los estambres constan de filamentos delgados portadores de anteras cilíndricas que contiene cada una entre 500 y 1000 granos de polen. El pistilo contiene el ovario, el estilo y el estigma.

1.5. Pericarpio

De consistencia fibrosa, varía de espesor y está formado por la cutícula, el mesocarpio y la capa de células entrecruzadas. La testa constituye la cubierta de la semilla y el endospermo la mayor parte del grano, y está conformado por sustancias almidonosas (Villar, 2011).

1.6. Fisiología

En las plantas que producen semilla, se distinguen tres fases de desarrollo, las cuales tienen períodos de crecimiento definidas en cuanto a la diferenciación de la planta. En el caso del arroz, estas fases son las siguientes:

- La fase vegetativa: Por lo general dura de 55 a 60 días en las variedades de período intermedio. Y comprende desde la germinación de la semilla, emergencia, macollamiento (ahijamiento), hasta la diferenciación del primordio floral.
- La fase reproductiva: Incluye el período desde la formación del primordio floral, embuchamiento (14-7 días antes de la emergencia de la panícula), hasta la emergencia de la panícula (floración). Esta fase dura entre 35 y 40 días.
- La fase de madurez: Abarca desde la emergencia de la panícula (floración), el llenado y desarrollo de los granos (estado lechoso y pastoso) hasta la cosecha (madurez del grano) y dura de 30 a 40 días.

En general el ciclo vegetativo y reproductivo de las variedades de arroz, varía de 120 a 140 días desde la germinación hasta a la cosecha del grano, aunque actualmente se encuentran variedades de arroz con 105 días a la cosecha con rendimientos aceptables (Penonomé, 2012).

2. Distribución e importancia económica

El arroz es el alimento básico para más de la mitad de la población mundial, aunque es el más importante del mundo si se considera la extensión de la superficie en que se cultiva y la cantidad de gente que depende de su cosecha. A nivel mundial, el arroz ocupa el segundo lugar después del trigo si se considera la superficie cosechada, pero si se considera su importancia como cultivo alimenticio, el arroz proporciona más calorías por hectárea que cualquier otro cultivo de cereales.

Según la FAO, la producción mundial en 2017 se estableció a 756.3 millones de toneladas de arroz cáscara (501.9 Mt base arroz blanco), en ligera alza en comparación a 2016. La reducción de la producción india y vietnamita fue apenas compensada por el incremento de la producción china. En Tailandia, la producción arrocera subió también gracias a una extensión de las áreas sembradas, así como en África donde las cosechas continúan globalmente a mejorar, sobre todo en las regiones occidentales, incrementándose de 6% en 2017. En cambio, en África Austral, especialmente en Madagascar, sequía y ciclones afectaron fuertemente las culturas, provocando una reducción de 14% de la producción de arroz. En Norteamérica, las cosechas bajaron de 20% debido a una reducción de las áreas arroceras, mientras que, en América Latina, la producción se incrementó gracias a las buenas cosechas en Brasil donde la producción subió de 16% en relación a 2016 (Méndez, 2018).

El arroz constituye un alimento significativo en Cuba; ampliar la superficie cultivada en el arroz es una vía para elevar los niveles de producción. Sin embargo, la utilización de nuevas tierras debe contemplar el traslado del cereal al lugar más próximo para el procesamiento industrial, o crear una nueva infraestructura en pos de este fin. Como resultado se deben dirigir, de forma interconectadas, el sistema de acciones para lograr un ascenso en los rendimientos productivos arroceros, cuyo impacto debe verse reflejado en un incremento de la producción nacional y en una disminución paulatina en las cantidades a adquirir en el mercado internacional (Pérez y Penichet, 2014).

2.1. Principales determinantes del rendimiento en la producción arrocera cubana

Las características del cultivo arrocero y, en especial, en Cuba (requerimientos industriales, suelos poco fértiles, entre otros), se torna necesario garantizar una mayor producción de alimentos en menor superficie cultivada, lo cual solo es posible mediante un incremento en los rendimientos productivos como indicador de eficiencia dentro del sector agrícola.

Teniendo en cuenta que los rendimientos deben ser considerados de manera multifactorial, se requiere de un análisis que permita identificar cuáles son aquellos factores de mayor incidencia en los niveles de producción del cultivo del arroz en Cuba, pues estos son los puntos de mira en el perfeccionamiento de la producción de la gramínea. Para un análisis más detallado de los rendimientos productivos y los factores de mayor incidencia en los niveles de producción del arroz, se torna indispensable un conocimiento básico del cultivo y de sus especificidades para la obtención de elevados resultados, ya que poseer tecnología de punta no garantiza de forma absoluta rendimientos favorables (Pérez y Penichet, 2014).

3. Requerimientos edafoclimáticos del cultivo

3.1. Clima

Se trata de un cultivo tropical y subtropical, aunque la mayor producción a nivel mundial se concentra en los climas húmedos tropicales, pero también se puede cultivar en las regiones húmedas de los subtrópicos y en climas templados. El arroz se cultiva desde el nivel del mar hasta los 2500 m de altitud. Las precipitaciones condicionan el sistema y las técnicas de cultivo, sobre todo cuando se cultivan en tierras altas, donde están más influenciadas por la variabilidad de las mismas (Villava, 2010).

3.2. Temperatura

Las altas y bajas temperaturas por encima y por debajo de los límites críticos afectan el rendimiento de grano ya que inciden sobre el macollaje, la formación de espiguillas y la maduración. Las bajas temperaturas limitan la duración del período y la tasa de crecimiento y el desarrollo de las plantas de arroz. Las altas temperaturas causan estrés térmico sobre las plantas de arroz.

3.3. Suelo

El cultivo tiene lugar en una amplia gama de suelos, variando la textura desde arenosa a arcillosa. Se suele cultivar en suelos de textura fina y media, propia del proceso de sedimentación en las amplias llanuras inundadas y los deltas de los ríos. Los suelos de textura fina, dificultan las labores, pero son más fértiles al tener mayor contenido de arcilla, materia orgánica y suministrar más nutrientes. Por tanto, la textura del suelo juega un papel importante en el manejo del riego y de los fertilizantes químicos y orgánicos (Franquet, 2002).

Con respecto a la acidez del suelo, los rangos de pH para el cultivo de arroz oscilan entre 5.5 y 6.5 cuando el cultivo es de secano y entre 7.0 y 7.2 cuando se trata de arroz acuático. La mayoría de los suelos tienden a cambiar su pH hacia la neutralidad pocas semanas después de la inundación mientras que para suelos alcalinos ocurre lo contrario, el pH óptimo para el arroz es 6.6, pues con este valor la liberación microbiana de nitrógeno y fósforo de la materia orgánica, la disponibilidad de fósforo son altas y además las concentraciones de sustancias que interfieren la absorción de nutrientes tales como; aluminio, manganeso, hierro, bióxido de carbono y ácidos orgánicos (David y Parsons, 2008).

4. Labores del cultivo

4.1. Preparación del terreno

Esta depende de la técnica de siembra a utilizar, ya sea arroz inundado como ocurre en la mayoría de las veces, para cultivos en secano. En la preparación esos factores se deben tomar en cuenta otros, que al final del ciclo del cultivo van a influir sobre el volumen de producción, entre ellos se puede mencionar, uso de herbicidas, insecticidas y cualquier otro producto destinado al control de plagas y enfermedades, así como el manejo de las aguas de riego.

La preparación del terreno en húmedo es un poco más laboriosa que la que se realiza en seco, su costo y uso se justifica ya que con ellas es posible el control de malezas, que disminuyen el valor del producto. Un inconveniente en su utilización es que, en zonas cálidas, donde el agua es un factor limitante es difícil disponer de los volúmenes de agua necesarios para inundar y fanguear (Guzmán, 2006).

4.2. Siembra

En el cultivo del arroz se utilizan varios métodos de siembra, cuya aplicación depende de las facilidades que tenga el productor y del área a sembrar. Se diferencian dos sistemas de siembra en el cultivo de arroz; siembra directa (con semilla seca en suelos secos o fangueados o pregerminada en suelos fangueados) y siembra indirecta o por trasplante. Es muy importante que el productor siempre se asegure de la germinación de la semilla, efectuando antes de la siembra una prueba de germinación de la semilla a utilizar, esto debe de observarse para evitar bajas densidades de siembra al sembrar semillas con bajo porcentaje de germinación (SAG, 2003).

4.3. Fertilización

Las necesidades medias de nutrientes/tm de producción de arroz son de 21 kg de nitrógeno, 11 kg de P_2O_5 y 18 kg de K_2O . De estos datos podemos deducir que un abonado, pensando en una producción de 7000 kg. Con frecuencia se añaden abonos foliares (N-P-K) a los herbicidas, para contrarrestar la depresión que éstos pueden producir en la planta de arroz. El sulfato de cobre se emplea para evitar la invasión de algas. El superfosfato y el sulfato potásico se distribuyen sobre el terreno en seco antes de inundar la parcela, incorporándolos con un pase de cultivador o grada de discos.

La mayor absorción de nitrógeno y potasio coincide con el período de máximo ahijamiento. La de fósforo, magnesio y calcio, con la fase final del ahijamiento. La mayor parte de los fertilizantes son absorbidos por las raíces antes de que empiece la fructificación. La absorción de elementos minerales es mayor cuanto mayor es el desarrollo de las raíces, el cual se ve favorecido por la oxigenación del terreno y por la circulación de agua de riego (Guzmán, 2006).

4.4. Riego

El consumo de agua es muy alto y son grandes las pérdidas por evaporación. Debe mantenerse también un adecuado control manual, químico y mecánico del enyerbamiento, pues las especies vegetales no convenientes proliferan con la humedad.

La alta humedad favorece el desarrollo de enfermedades en el cultivo. Como se extraen grandes volúmenes de agua para el sistema, puede conducir a la salinización de los mantos freáticos (Ríos, 2011).

4.5. Malezas

Las malezas se encuentran entre las principales plagas que interfieren con el cultivo de arroz, y para su manejo el productor realiza una inversión aproximada del 28% del costo total de producción. El cultivo de arroz tiene un periodo crítico de interferencia comprendido entre los 0-40 días de edad en el cual no deben presentarse malezas ya que pueden

provocar pérdidas del 45 al 75 % del rendimiento tanto en condiciones de siembra bajo riego como en secano, respectivamente, además las malezas son hospederas de insectos plagas y fitopatógenos (virus, hongos, nematodos y bacterias), aumentan los costos de producción debido a gastos adicionales de limpieza de los lotes dificultan labores de cosecha y reducen el valor del grano cosechado por alta presencia de impurezas (Peñaherrera, 2007).

ALTO POTENCIAL	BAJOS INSUMOS.	SECANO	S.SALINO	BIOFORTI CADAS
Reforma	IAC- 21	LC 88-66	IAC-25	IAC-21
LP-5	IAC-29	CARIBE 7	LP-7	IAC-25
LP-6	IAC-31	IAC-29	LP-10	IAC-30
LP-2	IAC-36	ECIA	LP-8	IAC-33
LP-14	IAC-30	IR-1529	IAC-40	
LP-15				
PERLA DE CUBA				
J- 104				
Prosequisa 4				

Figura 2. Principales variedades de arroz utilizadas en Cuba, a partir de estudios agronómicos.

5. Plagas y enfermedades

Según SAG (2003), el daño de los insectos que dañan el follaje de la plantación resulta severo afectando la producción del cultivo, por lo que el productor debe de observar la plantación en forma frecuente antes de que el daño este realizado, es decir que se debe de monitorear la plantación en forma diaria principalmente con más atención después de la aplicación de herbicidas y así detectar la presencia de plagas y recurrir al control temprano u oportuno cuando se inicia el daño en la plantación.

Entre las plagas que dañan el follaje están los insectos masticadores (gusanos), los insectos chupadores y las larvas barrenadores del tallo, siendo la *Spodoptera frugiperda* Smith la que más ataca a las plantaciones en Cuba.

Las enfermedades son también factores que limitan la producción de arroz en algunas áreas, sobre todo cuando se presentan condiciones ambientales favorables para el desarrollo de las enfermedades que afectan el cultivo. Debido a que las enfermedades pueden ocasionar daños severos en una plantación de arroz, es importante, que el productor sepa identificar y efectúe un monitoreo frecuente en su plantación para detectar los síntomas iniciales de la presencia de enfermedades, para proceder a tomar medidas de control o prevención.

Tabla 1. Principales enfermedades que ataca al cultivo del arroz en Cuba.

Nombre común de la enfermedad	Agente causal
Tizón o Quemado	<i>Pyricularia grisea</i> Cav
Mancha foliar castaña angosta	<i>Cercospora oryzae</i> Miyake
Decoloración de la vaina	<i>Pyrenochaeta oryzae</i> Miyake

6. Cosecha

La cosecha es una de las etapas más importantes del proceso de producción y cuando es mal realizada, ocasiona pérdida de grano, comprometiendo el esfuerzo y la inversión realizada en el cultivo. El contenido de humedad de los granos en esta labor constituye un factor determinante que permite la obtención de un mayor rendimiento de granos enteros en el proceso de beneficiamiento. Tres aspectos fundamentales deben tomarse en cuenta para la recolección del grano de arroz: época óptima de cosecha, el método de cosecha y las pérdidas de rendimiento y calidad del grano. El arroz debe cosecharse cuando el grano está maduro, para lo cual el mejor indicador es su contenido de humedad y el color del mismo. También se debe cosechar cuando el 95% de los granos en las espigas tengan color "pajizo" y el resto este amarillento, lo cual coincide con 18 un 20 a 25% de humedad en el grano.

7. Residuos de cereales

El principal residuo es la paja y los rastrojos, que presentan baja humedad, alto contenido en celulosa y alrededor de un 10% de lignina, la relación C/N es muy elevada, entre 80 y 100. La mayor parte se destina a la ganadería, donde se utiliza para la alimentación o como lecho. Otros posibles usos de la paja, aunque minoritarios son: obtención de papel paja, obtención de glucosa y furfural (componente en la fabricación de tableros), aislante y material de relleno en materiales de construcción, cultivo del champiñón, empleo como combustible, obtención de estiércol artificial, agente de aireación y/o fuente de carbono para el compostaje de residuos pastosos o excesivamente ricos en nitrógeno. La incorporación al suelo o enterrado de pajas comporta un aporte importante de materia orgánica al suelo y su posterior humificación, mejorando el balance de humus.

La cáscara de arroz constituye un subproducto del proceso agroindustrial con aplicaciones reducidas, que en la práctica puede considerarse como un material de desecho (por término medio, por cada tonelada de arroz se generan 200 kg de corteza o cascarilla).



8. Generalidades de la cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz, es un material de desecho de la industria arrocerera que se ha convertido en un problema de contaminación ambiental, ya que los molinos, piladoras o demás plantas procesadoras de arroz se encuentran cerca de las zonas urbanas o dentro de ellas. La cascarilla corresponde del 20 al 23% del peso del arroz con cáscara

El beneficio del cultivo de arroz genera un residuo, que tan sólo un 5% se está aprovechando, con aplicaciones reducidas, que en la práctica puede considerarse como un material de desecho.

Por sus características físicas y químicas la cáscara de arroz resulta poco biodegradable y se convierte en un desecho altamente contaminante en especial para las fuentes de agua.

9. Composición de la cáscara de arroz

Es un tejido vegetal constituido por celulosa ($\pm 40\%$) y sílice, presenta un alto contenido de dióxido de silicio (SiO_2), al fundirse con otros óxidos metálicos genera diferentes variedades de vidrio y se utiliza en la fabricación de cementos y materiales cerámicos. Entre los porcentajes más significativos de la cáscara de arroz se encuentran las cenizas, tiene un elevado contenido de materia volátil en comparación con los carbones, produciendo una combustión que genera un 20% de cenizas.

El contenido de humedad de la cáscara de arroz cuando sale del descascarador varía entre el 5% al 40% después de haber estado a la intemperie (en época no lluviosa por sus características químicas presenta un 10% de humedad).

10. Su uso como combustible

El poder calorífico de la cáscara de arroz es similar al de la madera y al de otros residuos agrícolas (debido a su composición alta en celulosa y sílice), por lo que inclusive se le ha considerado como una alternativa en usos domésticos. Se han desarrollado hornos para cereales que la utilizan como combustible, con lo que se obtienen un mejor rendimiento, el residuo después de quemarla puede ser usado en la construcción.

11. Conclusiones

Los rendimientos agrícolas del arroz pudiesen incrementar si se realiza un correcto manejo y si se tienen en cuenta las condiciones edafoclimáticas en que se desarrolla el cultivo.

Los residuos agrícolas generados por el procesamiento industrial pudiesen ser utilizados como biocombustibles por el poder calorífico que presenta y así eliminar las altas concentraciones de estos en los centros de acopio.

Referencias

- David, B., Parsons, M. (2008). *Manual para educación agropecuaria. Área de producción vegetal; 11*. 2ed. México. Trillas; SEP (Secretaría de Educación Pública) p, 21.
- Franquet, J. (2002). *Economía del arroz: variedades y mejora. Generalidades sobre el arroz y su cultivo*.
- Guzmán, D. (2006). *Manejo agronómico del cultivo de arroz*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Sede Regional San Carlos.
- Méndez, P. (2018). Fuerte alza de los precios mundiales. CIRAD: Informativo mensual del mercado mundial del arroz. *Infoarroz*, (167), 1-3.
- Ríos, A. (2011). *Ventajas y desventajas del cultivo de arroz bajo riego*. Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola.
- SAG. (2003). *Manual técnico para el cultivo de arroz*. Secretaría de agricultura y ganadería.
- Peñaherrera, L. (2007). *Manual del cultivo de arroz*. Instituto Nacional Átomo De Investigaciones Agropecuarias, 2 Edición. Estación experimental boliche. Guayaquil, 66, 123-124.
- Pérez, Magela y Penichet, M. (2014). Los rendimientos arroceros en Cuba: propuesta de un sistema de acciones. *Economía y Desarrollo*, 152(2), 138-154.
- Villar, P. (2011). *Descripción botánica del cultivo de arroz*. Ministerio de Agricultura y Ganadería. Dirección de Educación Agraria Colombia.

Girasol en Venezuela

Raúl Camacho-Marín*

Investigador Invitado de la Universidad Simón Bolívar. USB. Caracas - Venezuela

Hacienda Experimental Mutile. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Universidad Técnica "Luis Vargas Torres" de Esmeraldas. Provincia de Esmeraldas – Ecuador

*Autor para correspondencia: raul.camacho@utelvt.edu.ec

1. Descripción

El girasol pertenece a la familia Asteraceae y su nombre científico es *Helianthus annuus*. Se trata de una planta anual, con un desarrollo vigoroso en todos sus órganos. El girasol posee una raíz pivotante que puede alcanzar hasta los 2 metros en condiciones favorables, por lo que hay que pensar que cuanto más profundo sea el suelo, más capacidad de exploración tendrá la planta, aunque la mayor cantidad de las raíces secundarias se desarrollen entre los 5 y 30 cm de profundidad.

Su centro de origen se ubica en América Central y el sur de Norteamérica. La semilla de girasol (aquenio) tiene en la almendra alto contenido de aceite comestible de excelente calidad; además, es fuente de proteínas, hidratos de carbono, vitaminas y minerales. Según Rodríguez (2014), la torta que queda como residuo después de la extracción de aceite, es rica en proteínas y es utilizada para elaborar alimentos concentrados para animales. Los rendimientos promedios para Venezuela han sido si se quiere- bajos, 900-1200 kg/ha, aunque hay zonas donde se han conseguido hasta 2500 kg/ha.

Entre las características del girasol se consideran, que posee un tallo áspero y veloso, excepto en tu base, de consistencia semileñosa y maciza en su interior, que alcanza una altura de tres metros en la mayoría de los ejemplares de esta planta, y diámetros que varían entre 2 y 6 cm y una altura hasta el capítulo de 40 cm a 2 m, sin embargo, la planta de girasol más alta registrada alcanza 9.17 metros, tres veces este tamaño, las hojas del girasol son anchas, toscamente dentadas, ásperas y sobre todo disyuntivas, posee un involucro que es hemisférico, este mide de 15 mm a 40 mm, en algunos ejemplares puede medir más de 20 cm, las brácteas involucrales denominadas filarios.



Figura 1. Planta de Girasol.

El girasol posee una raíz pivotante y un sistema de raíces secundarios de las cuales nacen las terciarias que exploran el suelo tanto vertical como horizontalmente, en muchos casos las raíces profundizan poco ya que, si encuentran obstáculos naturales o tropiezan con suelas de labor, desvían su crecimiento horizontal y continúan su trayectoria verticalmente, dejando de explorar capas profundas, donde en algunos casos puede causar daños al cultivo.



Figura 2. Raíz pivotante.

Las hojas de girasol presentan una estructura alterna, de gran tamaño y largamente pecioladas, dentadas y además con áspera vellosidad tanto en el haz como en el envés. La planta de girasol presenta un número de hojas que varía entre 12 y 40 unidades, esto dependiendo de las condiciones del cultivo y la variedad. Una característica importante es su color, el cual varía entre verde oscuro y verde amarillento.

La flor del girasol es en realidad una "cabeza de flor" que posee numerosas pequeñas flores individuales de cinco pétalos denominados floretes.

Las flores exteriores, que se asemejan a pétalos, se llaman flores de rayos, cada «pétalo» consiste en un apéndice compuesto de pétalos fusionados de una flor de rayos asimétrica, en ocasiones se pregunta si ¿el girasol es una flor? Y la respuesta es no, debido a que ésta realmente es considerada una cabeza de flor que está compuesta por diferentes tipos de flores.



Figura 3. Receptáculo floral o capítulo

Debido a estas características, el receptáculo floral o capítulo puede tener forma plana, cóncava o convexa, además este es solitario y rotatorio y se encuentra rodeado por brácteas involucrales. Es relevante señalar que el número de flores se encuentra en un rango entre 700 y 3000 en variedades para aceite, mientras que este número aumenta a 6000 o más en variedades de consumo directo.

Son sexualmente estériles y pueden ser de color amarillo, rojo, naranja u otros colores, las flores en el centro de la cabeza se llaman flores de disco, estos maduran en fruta de girasol (semillas). Las flores del disco están dispuestas en espiral, generalmente, cada flósculo está orientado a un ángulo aproximadamente de 137.5° , produciendo un patrón de espirales interconectadas, donde el número de espirales izquierdas y el número de espirales rectas son números sucesivos.

Normalmente, hay 34 espirales en una dirección y 55 hacia la otra, sin embargo, en una cabeza de girasol muy grande podría haber 89 en una dirección y 144 en la otra, este patrón produce el empaque más eficiente de semillas matemáticamente posible dentro de la cabeza de la flor, todo esto forma el Girasol y sus partes.



Figura 4. Carácter multifloral del girasol. Ávila (2009).

Las semillas de girasol se clasifican en 3 grupos según su tamaño, las más grandes se denominan de grado 1, las intermedias 2E y 2, y las más pequeñas corresponden al grado 3E y 3. Según Ávila (2009) los platos recomendados para las siembras convencionales se adaptan mejor a las semillas de grado 2, necesitando graduaciones especiales para ajustar a los tamaños de las semillas de grado 1 y grado 3D y 3.



Figura 5. Semillas de girasol en sus diferentes tamaños.

2. Distribución

El girasol es nativo del continente americano, más precisamente de Norteamérica y Centroamérica. Su cultivo se remonta al año 1000 a. C., pero existen datos que indican que el girasol fue domesticado primero en México al menos 2600 años a. C. En muchas culturas amerindias, el girasol fue utilizado como un símbolo que representaba a la deidad del sol, principalmente los aztecas y otomíes en México, y los incas en el Perú. Esta planta también se encuentra en Ecuador, Colombia y Perú, además encontrarlo aún en forma silvestre.

3. Exigencias del Cultivo

La época de siembra para el cultivo de secano varía según la latitud, pero dura aproximadamente un mes a contar del inicio del verano. La siembra se debe efectuar en hileras separadas a 0.70 m, con una densidad de siembra de cuatro plantas por metro lineal.

3.1. Temperatura

Este factor es muy importante en el desarrollo del girasol, adaptándose muy bien a un amplio margen de temperaturas que van desde 25-30 a 13-17 °C. Si la temperatura es muy alta durante la floración y llenado del grano, provoca una importante pérdida en la producción final, tanto en peso como en contenido graso. La temperatura óptima del suelo para la siembra varía entre 8 y 10 °C.

3.2. Fotoperiodo

Las diferencias en cuanto a la apreciación de hojas, fecha de floración y a la duración de las fases de crecimiento y desarrollo son atribuidas al fotoperiodo.

Durante la fase reproductiva el fotoperiodo deja de tener influencia y comienza a tener importancia la intensidad y la calidad de la luz, por tanto, un sombreado en plantas jóvenes produce un alargamiento del tallo y reduce la superficie foliar.

3.3. Necesidades de agua

Durante la época de crecimiento activo y sobre todo en el proceso de formación y llenado de las semillas el girasol consume importantes cantidades de agua. El consumo de agua será máximo durante el periodo de formación del capítulo, ya que el girasol toma casi la mitad de la cantidad total de agua necesaria. La secreción de néctar está influida por la humedad atmosférica durante la floración.

3.4. Necesidades nutricionales

En cuanto al abonado, el girasol es un cultivo exigente en principios nutritivos y así, mientras que en trigo o maíz se cifran las extracciones de nitrógeno en 30 kg/t, en el girasol se fijan en 50 kg. Del 70 al 90% de nitrógeno se absorbe desde las 3-4 hojas hasta la plena floración.

Una buena fertilización en cantidad y en el momento oportuno es fundamental para conseguir altos rendimientos. La cantidad precisa de fertilizantes y/o enmiendas necesarias van a depender de los resultados de los análisis de suelos que deben realizarse antes de la siembra.

Las técnicas de mínimo laboreo o siembra directa pueden ahorrar costes de las labores, pero al no labrar, en muchos casos el gasto en herbicidas será mayor que el habitual. La raíz del girasol es pivotante y puede alcanzar zonas no exploradas por cultivos anteriores, pero en suelos fuertes o compactados, la penetración de la raíz puede encontrar dificultades.

3.5. Exigencias de suelo

Es un cultivo poco exigente en el tipo de suelo, aunque prefiere los arcillo-arenosos y ricos en materia orgánica, pero es esencial que el suelo tenga un buen drenaje y la capa freática se encuentre a poca profundidad.

La germinación de las semillas de girasol depende de la temperatura y de la humedad del suelo, siendo la temperatura media de 5 °C durante 24 horas. La profundidad de siembra se realiza en función de la temperatura, humedad y tipo de suelo.

En zonas húmedas con primaveras cálidas, con suelos pesados y húmedos, la profundidad de siembra es de 5 a 6 cm. En zonas con primaveras secas, con suelos ligeros y poca humedad, la profundidad de siembra es de 7 a 9 cm. Si el terreno es ligero y mullido la profundidad de siembra es mayor, al contrario que ocurre si el suelo es pesado.

Las plantas que proceden de siembras superficiales germinan y florecen antes que las procedentes de siembras profundas. Algunas variedades desarrolladas recientemente tienen cabezas decaídas. Estas variedades son menos atractivas para los jardineros que crían las flores como ornamento, pero atractivos para los granjeros, porque pueden reducir los daños producidos por los pájaros y las pérdidas por enfermedades vegetales.



Figura 6. Cultivo de Girasol.

4. Estadios fenológicos

La época de siembra va a depender de la ubicación de la zona agrícola y la capacidad de retención de humedad del suelo. En Venezuela los mejores resultados se han obtenido en zonas donde se utiliza el girasol como cultivo de salida de lluvias o después de un primer cultivo. Sin embargo, en algunos valles del oriente del país, se han logrado buenos resultados, pero con una alta incidencia de enfermedades foliares.

El girasol requiere, durante su ciclo vegetativo, un mínimo de 350 mm de lluvia, bien distribuida. Lo ideal es que la mayor parte de las lluvias se correspondan con el período de siembra-floración (45–55 días después de la siembra). Un exceso de lluvia en este período afecta la fecundación, dando origen a granos vanos y de bajo contenido de aceite. Durante la etapa de premadurez, después de la floración, el cultivo requiere de menores láminas de agua de lluvia (alrededor de 100 mm), que favorecen la formación de granos y la síntesis de aceite. Al entrar a madurez es preferible un ambiente seco.

Según las condiciones agroecológicas, en las regiones aptas para el cultivo de girasol, la época de siembra se ubica de la manera siguiente:

Según Ávila (2009), la época de siembra del Girasol en los Llanos Occidentales de Venezuela:

Tabla 1. Distribución de regiones y épocas de siembra.

Regiones	Fecha de siembra
Estado Cojedes	1 de julio – 30 de agosto
Estado Portuguesa	15 de agosto – 30 de septiembre
Estado Barinas	31 de agosto - 15 de octubre
Estado Lara	1 de julio – 15 de agosto
Estado Yaracuy	15 de julio – 31 de agosto

Soto (2006), afirma que también se manejan estos periodos en las zonas de:

Tabla 2. Distribución de regiones y épocas de siembra.

Regiones	Fecha de siembra
Norte de Guárico	15 de julio- 15 de agosto
Llanos Orientales	15 de junio- 15 de julio

5. Principales enfermedades y plagas

Existen enfermedades y plagas que se consideran potencialmente dañinas en cultivos de girasol, sin embargo, no se han registrado incidencias con nivel de ataque profundo para registrar una afectación relevante económicamente a analizar. Sin embargo, existen

plagas y enfermedades en cultivos de girasol que según Aponte (1989); Pineda y Ávila (1991) se han registrado en Venezuela:

- Mancha angular: esta enfermedad es causada por el hongo, *Alternaria Helianthi*, esta se reporta como la dispersa en cultivos de girasol y se recomienda sembrar cultivares resistentes, al inicio de la temporada de lluvias.
- Pudrición del cuello causada por *Sclerotium rofsii*, el daño se manifiesta como una pudrición en el cuello de la planta.
- Marchitez causada por *Fusariumoxysporum*.
- Pudrición del capítulo causada por *Rhizopus* sp.
- Manchas septoria causada por *Septoria helianthi*.
- Mancha marrón del tallo causada por *Phomosis* sp.
- Mancha negra del tallo causada por *Phoma oleracea*.
- Pudrición del tallo causada por *Erwinia* sp.

Según Ávila (2009), la mayor influencia de ataque de estas enfermedades, podría variar de acuerdo a la edad de la planta y la resistencia que presente el proceso al cultivar. Se conoce que la mayoría de los materiales tienen resistencia a la roya, y para ello se recomienda durante los cultivos, el uso de semillas certificadas además de no sembrar en áreas que se consideren contaminadas.



Figura 6. Cultivo de Girasol con presencia de daño por hongo *Macrophomina*.

En relación directamente a plagas se reportaron según Aponte (1991) al coquito perforador de las hojas del género *Systema* sp. y al gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) como las plagas más importantes. Sin embargo, en los últimos años la mosca blanca (*Bemisia* spp) se ha convertido en la plaga que más afecta al cultivo, complicándose su control químico, ya que se han encontrado más de 100 hospederos secundarios. Como plagas secundarias Arnal y Ramos (1991), señalan a los siguientes insectos: saltahojas (*Qncometopia* sp.), gusano peludo del girasol (*Chiosyne lacinia*), gusano del jojoto (*Heliothis* sp.) y al falso medidor (*Trichoplusia* sp.). Es importante eliminar los restos de cultivos anteriores del campo, ya que estos pueden resultar como hospederos de plagas.

6. Técnicas de cultivo

El cultivo del girasol se introdujo en Venezuela a partir de 1973. Los primeros cultivares probados provenían de Rumania, entre estos se destacaron la variedad 'Record' y los híbridos simples 'Romsum 90', 'Felix y Romsum 53'. Posteriormente en la década de los ochenta se introdujeron nuevas generaciones de cultivares principalmente híbridos provenientes de Argentina y los Estados Unidos tanto simples (dos parentales) como triples (tres parentales). Muy pocos de los híbridos que se introdujeron quedan en el mercado a excepción de la serie Morgan, 'M-731', 'M-734', y 'Contiflor 7'. El mejoramiento genético en el mundo se ha centrado en el incremento del contenido de aceite y tolerancia a enfermedades, caracteres como tipo de ácidos grasos, volcamiento también son de importancia en la generación de nuevos cultivares. En la actualidad es imperativo realizar las pruebas regionales de rigor, y en la medida de lo posible, incentivar la incorporación de líneas tropicalizadas en los cruces y así establecer cultivares con mejor adaptación a nuestras condiciones.

En las siembras directas, en tierras fuertes o si el suelo está compactado y resulta difícil el desarrollo radicular, aunque sea profundo, el cultivo puede tener problemas de implantación al no poder desarrollarse la raíz principal. En regadío, puede cultivarse en primeras siembras o como segunda cosecha tras un cultivo de invierno (cebada, colza, forrajes, cultivos para congelado, etc.). Para estas segundas cosechas, los riegos por aspersión y la siembra directa favorecerán que el cultivo pueda implantarse en el menor tiempo posible tras la recolección del anterior.

En primera cosecha en regadío, el techo de producción es limitado. En segunda cosecha, las producciones son menores, pero no tan bajas como para despreciarlas con relación a las primeras siembras, ya que esa producción sumada a la cosecha de invierno recolectada previamente, supera ampliamente al girasol de cosecha única. Sin duda alguna, la fecha de siembra en estos casos puede ser un factor decisivo; cuando antes se efectúe esa siembra, más garantía hay de que sea mayor la producción.

En secano, con el agua como uno de sus factores limitantes, hay que intentar que la siembra se haga en las primeras fechas en las que su nascencia sea factible, para conseguir el mayor desarrollo posible cuando lleguen los calores más fuertes y más escasa sea la humedad. En cultivos de secano es preciso relacionar los rendimientos del girasol con la profundidad del suelo y la oportunidad de las lluvias de verano, casi siempre en forma de tormenta.

A finales de los años 80 se realizaron ensayos de épocas de siembra (de enero a mayo) en distintos secanos, observándose que las siembras de últimos de marzo y primeros de abril fueron las que dieron mayores producciones. Las siembras excesivamente tempranas no tenían ningún interés, ya que la nascencia y floración se igualaban con siembras más tardías y el número de plantas en la recolección era inferior.

La profundidad de siembra es un factor que influye en el tiempo de emergencia de la semilla. En condiciones de baja humedad debe ser sembrado a mayor profundidad, en girasol se ha establecido hasta un máximo de 10 cm de profundidad. Una profundidad promedio con buena humedad debería ser de 4 cm para conseguir una buena germinación. El uso de sembradoras de precisión ha sido una práctica que ha aumentado el establecimiento

uniforme de planteles sobre todo en grandes extensiones. En Venezuela, dado la maquinaria utilizada, se ha establecido una distancia entre hileras de 0.80 a un metro, utilizando cinco semillas por metro, aunque se debe considerar que cada híbrido tiene una densidad óptima dependiendo de su porte y ciclo de duración.

Se recomienda una población de 45000 a 50000 plantas/ha en zonas de sabanas y de 50000 a 60000 en las demás zonas.

7. Cosecha de Girasol

La evolución del girasol se lleva bajo un ciclo de vida que inicia de 100 a 120 días desde la germinación hasta la cosecha. La operación de recolección debe iniciarse cuando la parte posterior del capítulo comience a tornarse de color castaño-amarillento y la mayoría de las hojas se hayan secado. La humedad de las semillas debe estar entre 12 y 14%. Inclusive, en ocasiones, las empresas receptoras han exigido hasta 10%, por ello hay que tratar, en lo posible, de que el periodo de cosecha coincida con la época seca. La cosecha del girasol tiene la ventaja que puede realizarse con equipos similares a los que se emplean para el maíz: a la misma cosechadora se le puede adaptar un cabezal específico para girasol y graduar las revoluciones del cóncavo de una manera sencilla.

8. Estudio económico

Realizar un análisis económico del girasol, al igual que en cualquier otro cultivo, resulta un tanto difícil, ya que las condiciones de cada explotación tienen sus diferencias debidos a los aspectos que ello involucra como ubicación, tamaño, grado de mecanización, cambios climáticos, entre otros, que podrían influir directa o indirectamente.

Los costos de producción en cada una de sus etapas podrían tener sus características particulares, incluso las políticas internas de cada país podrían influir en algunos casos. En referencia a este punto, no se logró identificar costos actuales de producción en Venezuela, sin embargo, se toma como referencia los establecidos por Argentina como principal productor en América Latina en reporte correspondiente al 2013 – 2017, tomando los siguientes indicadores:

Tabla 3. Precios dólares por tonelada.

Actividad	US/tn
Labranza	24.33
Semilla	18.67
Agroquímicos y fertilizantes	41.67
Cosecha	23.67
Total	108.33

En algunos casos, se ha considerados para algunos análisis económicos el tamaño que tienen las plántulas ya formadas, las cuales pueden medir entre 10 y 20 cm de altura,

las cuales proceden de viveros expertos en el cultivo de girasol. La Tabla 4 muestra según Ruiz, Villalba y Vera (2017) la estimación del costo de producción del grano de girasol.

Tabla 4. Costo de producción del grano de girasol.

Concepto	Unidad de medida	Cantidad	Precio en dólares
Semillas	Há	1	50.00
Fertilizante	kg/ha	230	130.00
Herbicida	Há	1	10.00
Mano de Obra	Jornal	1	10.00
Cosecha y transporte	Há	1	140.00
TOTAL			340.00

8.1. Precio de mercado

Según las estadísticas el cultivo de girasol ocupa el 3er lugar a nivel mundial por el volumen de producción entre las 7 principales semillas oleaginosas. En este sentido, Venezuela por su ubicación geográfica presenta una ventaja estratégica para la producción y exportación de semillas y derivados del girasol.

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), para el 2013 Venezuela ocupaba el puesto 33 en la lista de países en relación a la producción (Toneladas), así mismo, el mayor índice de producción de aceite de girasol se obtuvo en el año 1990 con un total de 54.822 toneladas. Actualmente el precio en el mercado está sujeto a las políticas de comercialización y aranceles fijados a nivel internacional.

Durante el período de 1986 hasta 2013 según la FAO los índices de producción en aceite de girasol fluctuaron como se muestra en el Gráfico 1.

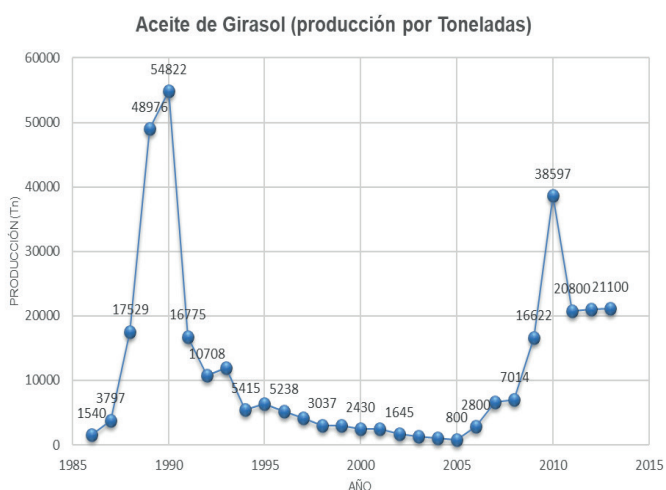


Gráfico 1. Producción de aceite de girasol en Venezuela durante el período 1986- 2013.
 Fuente: Elaboración propia. (Datos FAO).

9. Características energéticas del girasol

Para la producción de biocombustible, los estudios señalan que el biodiesel puede producirse a partir de algunos aceites vegetales de cultivos oleaginosos, de las cuales se pueden mencionar la semilla de soya, cártamo, girasol, canola, entre otras.

Específicamente el girasol se considera una planta con excelentes cualidades para su cultivo y aprovechamiento agrícola, ya se puede obtenerse de ella aceite para consumo humano, animal y biodiesel (cultivo energético)

La semilla de girasol se caracteriza por tener alto contenido de ácido linoléico y es considerado dentro de las oleaginosas a nivel mundial, ocupando el tercer lugar en el cual lo anteceden la colza (37 millones de toneladas) y la soja (170 millones de toneladas) dentro de los cultivos energéticos alternativos. Mediante experimentos y modificaciones genéticas, se ha logrado obtener aceite de girasol con mayores porcentajes de ácido oleico y ácidos grasos, los cuales mejoran las propiedades del biodiesel obtenido.

Tabla 5. Porcentaje de ácidos grasos en aceite de Girasol.

Ácidos grasos	Porcentaje
Ácido mirístico	≤0.1
Ácido palmítico	4-9
Ácido esteárico	1-7
Ácido oleico	14-90
Ácido linoleico	48-74
Otros	-

10. Conclusiones

El Girasol no es un cultivo nuevo, su transcendencia remota de varios años y diferentes civilizaciones con diversos usos y aplicaciones en la economía de los países. Entre ellos se ha considerado su uso potencial dentro de la alimentación para aceite comestible de semilla de girasol, así mismo para diversos proyectos orientados a la producción de biodiesel donde se le atribuye un pronóstico prometedor para aquellos países que asuman el reto de seguir adelante, de esta manera los cultivos de girasol, podrían llegar a ocupar un lugar en la alternativa bioecológica del planeta mediante energía renovable. Cada región del planeta, maneja sus características ambientales específicas, sus necesidades y condiciones políticas, económicas y sociales, pero todas tienen algo en común, EL PLANETA; y el allí donde se deben enfocar estas investigaciones debido a que si la 4ta revolución ya se encuentra en marcha a través del uso de la tecnología y aspectos como los precios al igual que otros factores tecnológicos y de comunicación, pueden definir su expansión. Las técnicas de

mínimo laboreo o siembra directa pueden ahorrar costos de las labores, pero al no labrar, en muchos casos el gasto en herbicidas será mayor que el habitual.

Al compartir experiencias en relación a los cultivos energéticos, abrimos una puerta al mundo, donde se visualiza lo que en cada región se ha logrado y bajo las condiciones en que se están desarrollando, para de alguna manera contribuir al avance en temas de energía renovable para Latinoamérica. En general, el mejor comportamiento del girasol se obtiene en zonas donde el cereal ha alcanzado las mayores producciones, debido a las condiciones del suelo y donde el riego y los cuidados fitosanitarios se han considerado.

Las condiciones de producción de girasol para combustible y sus derivados en energía renovable se considera una gran oportunidad de inversión en Venezuela, para contribuir al desarrollo de la economía mediante las ODS (Organizaciones con Desarrollo Sostenible), aumentan del poder adquisitivo mediante prácticas agrícolas y medioambientales que benefician la calidad de vida y el comercio con otros países. Las condiciones ambientales están a disposición y el girasol es uno de los cultivos que según la Guía Agropecuaria de Venezuela 2018 se considera como emblemático y tradicional.

Referencias

- Aponte, A. (1991). *Enfermedades del girasol detectadas en Venezuela*. Boletín Técnico No 6. IICA-BID-PROCIANDINO. Investigaciones en adaptación de los cultivos girasol, soya y maní. Edición PROCIANDINO. Quito. Ecuador. pp: 25-33.
- Arnal, E., Ramos, F. (1991). *Insectos relacionados con el cultivo de girasol*. Boletín Técnico No 6. IICA-BID-PROCIANDINO. Investigaciones en adaptación de los cultivos girasol, soya y maní. Edición PROCIANDINO. Quito. Ecuador. pp: 19-24.
- Ávila, J. (2009). *Manual para el cultivo del girasol*. Maracay, Venezuela. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias.
- INFOAGRO (2010). *El cultivo del girasol (1ª parte)*. Consultado el 25 de mayo de 2019. Recuperado: <http://www.infoagro.com/herbaceos/oleaginosas/girasol.htm>
- Rodríguez, E. (2014). *Biodiversidad en Venezuela. Girasol (Helianthus annuus)*. Sub-proyecto informática, UNELLEZ. Guanare – Venezuela. Recuperado: <https://biodiversidad-venezuela.jimdo.com/especies-de-flora/girasol/>
- Ruiz, T., Villalba, M., Vera C. (2017). *Análisis de producción del girasol (Helianthus annuus L.) y subproductos en el distrito de Yby Yaú, Departamento de Concepción*. Recuperado: <https://anaisonline.uems.br/index.php/ecaeco/article/download/2573/2746>
- Soto, E. (2006). El cultivo de girasol en Venezuela. *Revista CENIAP Hoy*, 9. Recuperado de <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/girasol-en-venezuela-t26679.htm>

Evaluación financiera del uso de bagazo para la generación de electricidad en Nicaragua

Napoleón Blanco*

Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad Nacional de Ingeniería. Nicaragua.

*Autor para correspondencia: blanco.napoleon@fec.uni.edu.ni

1. Introducción

El uso de los recursos energéticos biomásicos en Nicaragua se ha basado sustancialmente en la explotación de la leña y el carbón con destino de uso doméstico primordialmente; la participación mayoritaria de la biomasa en el uso de la energía es en la forma leña (97.5%), siendo minoritario el empleo en otras energías comerciales (2.4%) y de consumo doméstico como Gas Licuado de Petróleo (GPL) con un 2.5% (Multiconsul, 2006). Lo anteriormente expuesto, significa que se está haciendo uso ineficiente de la biomasa desde el punto de vista energético y se está ejerciendo una presión ambiental representada por la deforestación de gran parte del territorio nacional para obtener la biomasa empleada.

Por otra parte, sigue latente el problema de la importación de los energéticos derivados del petróleo de los países centroamericanos, incluido Nicaragua, cuyo consumo crece llegando a representar un gran porcentaje de las importaciones de la factura petrolera regional lo que contribuye a debilitar sustancialmente las economías de estos países (CEPAL, 2008). De forma que, la utilización racional de los recursos energéticos importados, así como el desarrollo de recursos nacionales alternativos, se ha hecho cada vez más necesario en vista de las distorsiones provocadas en los esquemas productivos de las economías del istmo centroamericano. Además, debemos reconocer que Nicaragua como parte de Centroamérica es "tomadora de tecnología", es decir, utiliza la tecnología y los bienes de capital que producen los países industrializados, lo que también está determinando sus patrones de consumo de energía (Selva y Umaña, 1988).

De forma que, en Nicaragua la mejor solución al tema de uso de recursos energéticos energético pasaría por una planificación y provisión diversificada, donde todas las fuentes no convencionales como la biomasa contribuyan a la generación eléctrica (en forma

complementaria a los sistemas tradicionales) en la proporción que, económica y geopolíticamente, resulten más conveniente para el País. En este capítulo evaluaremos financieramente el uso del bagazo de caña de azúcar empleado para generar energía eléctrica en sistemas de cogeneración en ingenios azucareros de Nicaragua.

2. Característica general del cultivo de caña de azúcar

La caña de azúcar es una planta gramínea tropical cuyo nombre científico es *Saccharum officinarum* y cuenta con un tallo macizo de dos a cinco metros de altura y entre cinco a seis centímetros de diámetro del cual se puede extraer un jugo compuesto por sacarosa, sustancia que se extrae y se cristaliza en los molinos de los ingenios para producir azúcar (Munguía y Ramos, 2015). No obstante, de la caña de azucara se puede obtener además de azúcar otros subproductos como melaza que sirve de alimento animal, ron, etanol y del desecho en forma de bagazo se obtiene energía eléctrica.

La siembra de la caña de azúcar suele iniciar en el mes de noviembre con el comienzo de la Zafra y concluye en el mes de junio del siguiente año con la Zafrita, que es la siembra temporal de caña, por lo que su cosecha se puede considerar de forma anual.



Figura 1. Plantación de Caña de azúcar en Ingenio San Antonio.

Para las labores agrícolas en los ingenios azucareros se usa una combinación del empleo de maquinarias y el uso de mano de obra local lo que genera muchas fuentes de empleos. La preparación del suelo durante la siembra tiene como fin permitir el desarrollo de las raíces de la planta; además, se hace necesario de una adecuada cantidad de agua para que permita la absorción y asimilación de los nutrientes lo que se logra con sistemas de riego. Los ingenios realizan riegos por gravedad, por pivote, por aspersión y por goteo y se usa un sistema láser para nivelación de terrenos; así mismo, en la actualidad se está implementando el fertirriego que consiste en emplear las aguas residuales de la fábrica de azúcar y la destilería de alcohol en el riego de las plantaciones de caña; mejorando así el reciclaje de nutrientes, permitiendo el ahorro en el uso de fertilizantes y disminuyendo el impacto ambiental de la disposición de las aguas residuales al medio circundante (SER, 2019).

Además, el control de plagas y malezas se realiza de forma manual y mecanizada; además, se emplea un control químico y biológico de malezas utilizando hongos

entomopatógenos para el control de plagas. Por lo que, de manera general el cultivo de caña de azúcar puede manejarse de forma tal que este con un equilibrio con el medio ambiente; aunque se cierne el peligro de contaminación de las fuentes de agua subterráneas sin o se tiene cuidado con el manejo de agroquímicos con potencial de contaminación.

Por otra parte, el cultivo de la caña de azúcar se ha concentrado en el área de occidente de Nicaragua por ser áreas calientes y bastante soleadas lo que favorece la fotosíntesis para la producción de carbohidratos, como la celulosa y otras materias que constituyen el follaje y el soporte fibroso del tallo. Así mismo, mucha de las fincas que ahora siembran la caña de azúcar estaban en descanso o dedicada a la siembra de productos muy poco rentable y otras fincas tenían disponibilidad de tierras que anteriormente eran usadas para el monocultivo del algodón que desapareció en la década de los años setenta.

3. Empleo de la biomasa en forma de bagazo para la generación de Energía Eléctrica

Para generar energía eléctrica a partir del bagazo de la caña es necesario el empleo de sistemas térmicos complejos debido al bajo poder calórico de este tipo de biomasa y por su alto porcentaje de humedad. De forma que, para el empleo de bagazo de caña como energético se necesita de plantas de generación con grandes calderas y volúmenes de hogar, resultando de mayor tamaño que si emplearan combustibles convencionales; lo que provoca un aumento considerable de las inversiones requeridas para el uso de este recurso energético.

No obstante, la aplicación de la biomasa sólida para la generación de energía eléctrica contribuye a la robustez de la red de distribución por que este tipo de energético tiene la capacidad de proporcionar al sistema eléctrico garantía de suministro a cualquier hora del día y con diferentes condiciones meteorológicas producto de la posibilidad de almacenamiento del energético y de la planeación de su empleo (CERDA, 2018).

En Nicaragua, la biomasa sólida en forma de bagazo de caña es empleada como recurso energético en los ingenios azucareros San Antonio, Monte Rosa, CASUR y Monte Limar que son agentes del mercado eléctrico y están conectados al Sistema interconectado Nacional (SIN). Los ingenios antes mencionados generan energía eléctrica para autoconsumo y venta al mercado nacional e internacional a través de la interconexión del país con toda Centroamérica desarrollando un proceso productivo complementario al de alimentos y energía.

En los ingenios azucareros la caña de azúcar se cultiva, se cosecha y luego se dirige a la molienda de donde se obtiene: bagazo como desecho, melaza y jugo de caña. Del jugo de la caña, se obtiene el azúcar destinado para el consumo nacional y a la exportación; de la melaza, se obtiene licor que también se comercializa a nivel nacional e internacional y el etanol que se destina a mercados internacionales exclusivamente.

Por su parte, el bagazo de caña se destina un proceso de cogeneración para la producción simultánea de vapor, utilizado en el proceso productivo de azúcar, melaza, jugo de caña, y en la generación de energía eléctrica. Fuera de zafra, se está comenzando a explorar la posibilidad de implementar el uso de cultivos energéticos, especialmente de la especie eucalipto, para generar el vapor del sistema de cogeneración antes mencionado.

A continuación, se describe en la figura numero dos el proceso de aprovechamiento industrial de la caña de azúcar en los ingenios azucareros.

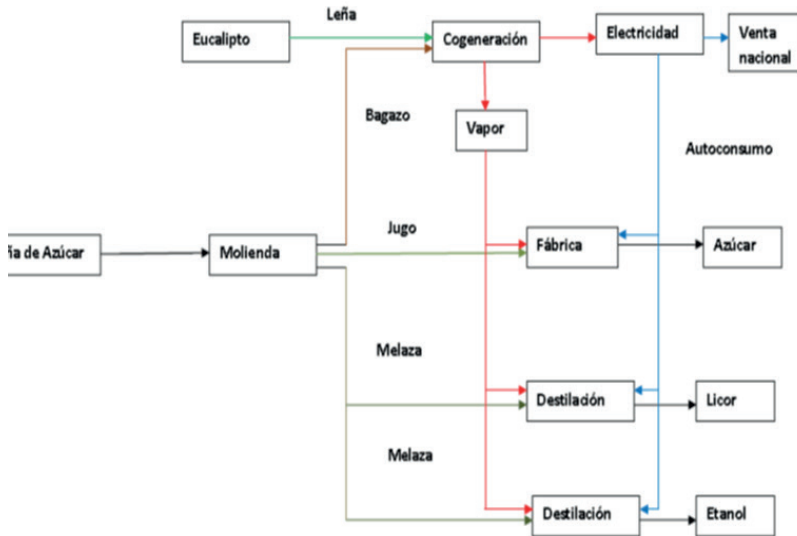


Figura 2. Flujo de producción de los Ingenios Azucareros de Nicaragua con sistemas de cogeneración y conectados al Sistema Interconectado Nacional.

4. Índices productivos del uso de caña de azúcar para la generación de energía eléctrica

El modelo de negocio de los ingenios es el empleo de la caña de azúcar para la producción de azúcar, melaza y partir del bagazo de caña generar energía eléctrica en la mayoría de los ingenios, excepto el Ingenio San Antonio, que adicionalmente produce ron y etanol. De manera que, el ciclo productivo de los ingenios inicia con el corte de la caña de azúcar extrayéndose 68.6 toneladas de caña por manzana (Mz) cultivada como promedio en los ingenios nicaragüenses (INE,2019). El cultivo de caña de azúcar representa un área de cultivo de alrededor de 101 000 manzanas sembradas con caña de azúcar, más de 800 productores privados de caña, 4 ingenios azucareros, 35283 empleos directos y más de 120000 empleos indirectos generados. De modo que, se estima que existe una inversión agrícola en la caña de azúcar superior a los US\$ 200 000 000 de dólares (Munguía y Ramos, 2015).

Adicionalmente, a partir de la caña molida se extraen en promedio 138.5 quintales de azúcar por manzana. Así mismo, se producen en promedio 70 231 toneladas métricas de melaza anualmente que es destinada a la industria de alimentos para el ganado. Sumado a lo anterior, el Ingenio San Antonio es el único que cuenta con una capacidad instalada de producción de 340 000 l/día de etanol. Además, los ingenios generan energía a partir del bagazo de la caña a través de la cogeneración que permite la producción de energía térmica para el proceso productivo y para la generación de vapor que luego es turbinado para la generación de energía eléctrica.

Durante el periodo de zafra los ingenios generan en promedio de 0.9 MW-HR por tonelada de caña y como son agentes del mercado eléctrico nicaragüense venden esa energía a un precio promedio de 109 US\$/MW-HR (DNC,2019). Fuera de Zafra el Ingenio San Antonio está utilizando estillas de eucalipto para la generación de energía eléctrica con un consumo promedio anual de 24.49 toneladas métricas. El costo variable de los ingenios es de 37.64 US\$/MW-HR y que implica cuánto cuesta la generación de cada MW-HR empleando bagazo de caña.

Por otra parte, por cada tonelada de caña molida, se extraen 0.35 toneladas de bagazo (Van den Brock et al., 1998); por lo que, los ingenios producen 24 ton de bagazo por manzana. Los ingenios con sistemas de cogeneración poseen contratos de venta de energía donde se asigna un precio por la disponibilidad o pago de potencia disponible que se paga para amortizar la inversión y un costo de energía eléctrica que se actualiza anualmente en función del Índice de precios al productor de los Estados Unidos de Norteamérica. De forma que, el precio de la energía vendida por los ingenios es en realidad un costo variable que incluye costos de operación y mantenimiento e incluyen el costo del bagazo y el eucalipto.

5. Análisis de costos de producción

Considerando los costos de producción del uso del bagazo similares a los del uso de eucalipto para generar energía eléctrica sobre todo por poseer un poder calorífico similar se tiene un costo actualizado de US\$ 13 por tonelada de eucalipto y un costo de US\$ 7 para el caso de la tonelada de bagazo (tablas 1 y 2), este costo es muy similar al estimado por (López, 2003) quien estimo un costo unitario de US\$/ ton de 7.3 considerando el cultivo con renovación, uso de riego, costos financieros y costo de comercialización que incluye corte, alza y transporte.

Tabla 1. Costo actualizado de Eucalipto.

Costo de Tonelada de Eucalipto		
Rubro	Año base 1997 \$/ton	Costo actualizado \$/ton
Establecimiento del cultivo \$/ton	0.28	0.4
Mantenimiento	0.27	0.4
Alquiler de tierra	0.71	1.1
Cosecha	0.11	0.2
Descarga	0.26	0.4
Transporte	0.4	0.6
Secado	0.11	0.2
Costo indirecto	0.2	0.3
Costo combustible	2.3	3.6
O&M	0.87	1.3
Inversión planta	0.78	1.2
Utilidades	2.3	3.6
Costo de ton	8.59	13

Obtenido en base a Van den Brock, R y Van Wijk, A. (1998).

Tabla 2. Costo actualizado de Bagazo de caña.

Costo de Tonelada de Bagazo		
Rubro	Año base 1997 \$/ton	Costo actualizado \$/ton
Establecimiento del cultivo \$/ton		0.0
Mantenimiento		0.0
Alquiler de tierra		0.0
Cosecha		0.0
Descarga		0.0
Transporte		0.0
Secado	0.11	0.2
Costo indirecto	0.2	0.3
Costo combustible	1.3	2.0
O&M	0.83	1.3
Inversión planta	0.64	1.0
Utilidades	1.5	2.3
Costo de Bagazo ton	4.58	7

Obtenido en base a Van den Brock, R y Van Wijk, A. (1998).

6. Modelo financiero

El empleo del bagazo de caña de azúcar para la generación de energía resulta en la práctica una actividad rentable toda vez que ha sido adoptada por todos los ingenios de Nicaragua quienes no han dudado en aprovechar este desecho industrial y producir calor para su sistema industrial y generar energía eléctrica para consumo propio y el excedente lo venden al mercado eléctrico nacional siendo por tanto un negocio con lucro. No obstante, para el análisis financiero del uso energético del bagazo se necesita información sensible que los ingenios no suministran y solo se tiene acceso a la información que publican en los medios oficiales por lo que se optó por presentar un modelo de análisis financiero de un proyecto de una central de generación tipo.

El modelo financiero considerado como caso de estudio considera una planta de generación de energía que usa biomasa en la forma de bagazo de caña de azúcar como combustible con una capacidad de un mega watt de potencia instalada. Se considera un horizonte de planeamiento de 15 años. La inversión considera el costo del generador y a la infraestructura de montaje necesaria para su operación; además, de considerar la inversión intangible en costos de diseños, licencia de generación y otros gastos legales. Así mismo, se considera como parte de la inversión el capital de trabajo que incluye la disponibilidad de liquidez necesaria para la operación de la central el tiempo necesario para la obtención de ingresos por la venta de energía el primer mes.

Los ingresos de la central están basados en la venta de energía y disponibilidad de potencia; así como, la venta de bonos de carbono por ser una generación energética sustentable. También, son considerados como ingresos el valor de rescate de los activos al final del

horizonte de planeamiento y la posible amortización de los activos intangibles. Los costos constituyen las depreciaciones que se permiten por ley asumirlos antes de impuesto y los costos de operación y mantenimiento; los costos financieros también se consideran antes de impuesto, para ello se elaboró una tabla de pago sobre saldos; no obstante, el pago de capital que se considera luego de tasar los impuestos.

El flujo financiero se evalúa con una tasa mínima de rendimiento del 30% debido a que la tasa del sector eléctrico nicaragüense es poco conocida y solo se publica la considerada en el negocio de distribución alrededor del 14 % que se incluye en las tarifas aplicadas a los consumidores finales. Y como resultado de la aplicación del modelo financiero al caso de estudio se tiene que para este proyecto tipo de generación de energía de una planta de un mega watt es rentable su operación bajo los supuestos considerados (ver flujo financiero en anexos) con un valor actual neto positivo de \$ 188,901 y una tasa interna de retorno considerable del 53 %.

7. Conclusiones

En Nicaragua la biomasa solididad es empleada principalmente de forma no tradicional para cocción. No obstante, los ingenios azucareros están utilizando el bagazo de caña del proceso de producción de azúcar y madera de eucalipto para la cogeneración que les permite generar energía térmica para el proceso productivo y a la vez la generación de energía eléctrica para su autoconsumo industrial y el excedente lo venden al mercado eléctrico nacional.

El aprovechamiento del desecho de producción bagazo de caña para la generación de energía eléctrica resulta ser una actividad económica muy rentable puesto que su uso implica la ventaja de su aprovechamiento dual como fuente de calor para la fábrica y como una fuente de generar la electricidad para el suministro del proceso industrial para la producción de azúcar y otros subproductos previamente mencionados.

El uso energético del bagazo de caña tiene beneficios económicos de su conversión energética puesto que genera ingresos financieros en vez de costos por su disposición como desecho y evita su disposición a la intemperie sin uso evitando su degradación natural. Por otra parte, la generación de energía eléctrica con el bagazo de caña se convierte en un recurso renovable puesto que proviene de la biomasa de este cultivo y genera un producto energético que puede colocarse en el mercado eléctrico a un precio menor que la misma unidad energética generada con combustible fósiles aun si considerar las externalidades negativas asociadas a este tipo de combustible convencional.

Referencias

- CEPAL. (2008). *La energía y las metas del milenio en Guatemala, Honduras y Nicaragua*, Naciones Unidas.
- Cerda, E. (2018). *Energía obtenida a partir de la biomasa*. Cuadernos Económicos de ICE Universidad Complutense de Madrid. <https://doi.org/10.32796/cice.2012.83.6036>.

- Despacho Nacional de Carga (DNC). (2019). *Programación de sistema Interconectado Nacional*. Obtenido desde: <http://www.cndc.org.ni/>.
- Instituto Nicaragüense de la Energía, INE. (2019). *Estadísticas de Electricidad*. Obtenido desde: <https://www.ine.gob.ni>
- López, L. (2003). *Comercialización de la caña de azúcar en Nicaragua, casos comparativos con Honduras y Costa Rica* (No. B-0427e). IICA, San José (Costa Rica).
- Multiconsult. (2006). Encuesta nacional de leña. Diagnóstico sobre oferta de consumos energéticos.
- Munguía, P., Ramos, E. (2015). *Estructura Productiva del Azúcar en Nicaragua, período 2009 -2013*. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
- Selva, G., Umaña, A. (1988). *Administración de la Energía, editorial universitaria centroamericana*, San José Costa Rica 1988.
- SER, Ingenio San Antonio. (2019). *Siembra y cultivo de la caña de azúcar*. Recuperado de: http://www.nicaraguasugar.com/index.php?option=com_content&view=article&id=8&Itemid=175
- Van den Brock, R., Van Wijk, A.1998. Electricidad a partir de Eucalipto y Bagazo en Ingenios Azucareros de Nicaragua. Obtenido desde: <http://www.fao.org/3/x2351s/x2351s00.htm#TopOfPage>

Apéndice 1. Flujo financiero

Flujo financiero de una planta de generación de energía de 1 MW de potencia que emplea bagazo de caña para la generación de energía eléctrica.

FLUJO FINANCIERO PROYECTO TIPO 11MW																
HORIZONTE DE EVALUACION DEL PROYECTO																
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
FLUJOS DEL PROYECTO																
Inversión total	345,564.00															
- capital de trabajo	2,350,000.00															
- capital de trabajo p.	4,704															
(+) Ingresos netos (Atom)	44,688,720	44,688,720	44,688,720	44,688,720	44,688,720	44,688,720	44,688,720	44,688,720	44,688,720	44,688,720	44,688,720	44,688,720	44,688,720	44,688,720	44,688,720	44,688,720
Venta de biomasa	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00
Venta de potencia MW/DIA	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00	14,400.00
Venta de biomasa de carbono	21,900.00	21,900.00	21,900.00	21,900.00	21,900.00	21,900.00	21,900.00	21,900.00	21,900.00	21,900.00	21,900.00	21,900.00	21,900.00	21,900.00	21,900.00	21,900.00
Costos totales	272,832.00	271,284.00	268,128.00	265,936.00	263,492.00	260,524.00	257,192.00	253,424.00	249,180.00	244,456.00	239,160.00	233,296.00	226,864.00	220,872.00	215,320.00	209,200.00
(-) Costos totales	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00
Costos de mano de obra	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00	117,896.00
Depreciación	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00
Costos financieros(interés)	117,600	109,776	101,920	94,080	86,240	78,400	70,560	62,720	54,880	47,040	39,200	31,360	23,520	15,680	7,840	
(e) Utilidad bruta	17,400,920	17,485,720	17,718,520	17,857,200	18,002,240	18,168,200	18,345,760	18,535,200	18,736,400	18,949,280	19,173,920	19,409,760	19,657,120	19,915,360	20,184,800	20,465,600
Impuesto 30 % sobre la renta	5,221,476	5,245,516	5,270,556	5,296,596	5,323,636	5,350,676	5,378,716	5,406,756	5,434,796	5,462,836	5,490,876	5,518,916	5,546,956	5,574,996	5,603,036	5,631,076
Utilidad después de impuestos	12,179,444	12,240,204	12,447,964	12,560,604	12,678,604	12,817,524	12,967,044	13,128,444	13,291,604	13,465,544	13,640,044	13,815,164	13,990,944	14,167,364	14,344,444	14,522,144
Depreciación	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00	233,200.00
(+) Valor de rescate																
(-) Pagaros																
(-) Pago al principal	15,680	15,680	15,680	15,680	15,680	15,680	15,680	15,680	15,680	15,680	15,680	15,680	15,680	15,680	15,680	15,680
(e) Flujo neto efectivo	-245,904.00	126,772.00	131,868.00	136,964.00	142,060.00	147,156.00	152,252.00	157,348.00	162,444.00	167,540.00	172,636.00	177,732.00	182,828.00	187,924.00	193,020.00	198,116.00
(+) Flujo neto de cinco actualizado	30%	99,749.57	77,799.91	60,024.59	46,555.53	36,107.56	28,022.44	21,115.26	16,033.60	12,026.27	9,022.90	6,848.09	5,216.32	4,016.32	3,055.82	2,309.83
TREMA																
VAN	30%															
TIR	30%															

Apéndice 2. Supuestos del flujo financiero

Financieros	
Costo Estimado de una planta de 1 MW en \$ americanos	1110
Tasa de Rentabilidad minima atractiva	30%
Costo de la energia generada \$/MW-HR	109
Costo de la potencia \$/MW	60
Costo variable que oncluye operación y mantenimiento \$/MW-HR	37.64
Económicos	
Tasa Social de Descuento	12.00%
Inversión en US\$	
Costos del generador	235,200
Generador	196,000
Infraestructura y montaje	39,200
Intangibles	4,704
Licencia	2,352
Diseños	1,176
Otros permisos	1,176
Capital de trabajo	6,000
Administracion	2,000
Servicios publicos	1,000
Personal	3,000
Costo de energía vendida \$/MW-HR	109
Costo de potencia \$/MW	60
Venta de bonos de carbono \$/MW-HR	5
Gastos de operación 2% del costo de generador	9408

Jatropha curcas en Ecuador

Acosta-Chapi, J.^{1*}, Franco-Rodríguez, J.¹, Kuffó-García, A.¹, Peñalver-Romeo, A.¹, Riofrío-Figueroa, M.¹, Mena Campoverde, C.², Velázquez-Martí, B.³

¹Carrera de Agropecuaria, Facultad Educación Técnica para el Desarrollo. Universidad Católica Santiago de Guayaquil. Av. Carlos Julio Arosemena km 1½, Guayaquil, Ecuador.

²Carrera de Economía. Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas. Universidad Católica Santiago de Guayaquil. Av. Carlos Julio Arosemena km 1½, Guayaquil, Ecuador.

³Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria. Universitat Politècnica de Valencia. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España.

*Autor para correspondencia: judith.acosta@cu.ucsg.edu.ec

1. Datos Generales



Fuente: Corporación Eléctrica del Ecuador

<https://www.celec.gob.ec/termopichincha/index.php/retos-empresariales/proyectos-de-generacion-no-convencional/proyecto-biocombustible>

- Nombre vulgar: Jatrofa – Piñón de tempate
- Nombre científico: Piñón (*Jatropha curcas*)

2. Origen y Distribución

El piñón es oriundo De América del Sur, durante la antigüedad fue muy beneficioso para combatir enfermedades tales como el cáncer y la lepra. Es cultivado con mayor rango en los países tropicales y subtropicales. Se distribuye ampliamente en el caribe, Centroamérica, Asia y África y centro América, como es el caso de Cuba se usa para jabones artesanales y la glicerina (Solís, 2013; INIFAP, 2011; Hablemosdeeflores, s.f.)

3. Descripción

3.1. Características generales

El Piñón (*Jatropha curcas*) es un matorral Caducifolio que tiene un gran tamaño y gran crecimiento, pertenece a la familia de las Euphorbiaceae (Solís, 2013). Tienen un porte de dos a tres metros y si es posible puede crecer hasta ocho metros (Alfonzo, 2008), el diámetro de su tronco llega a ser de catorce a dieciocho centímetros. Se caracterizan por poseer una corteza externa lisa escamosa y muy delgada de color pardo claro (INIFAP, 2011) las hojas son anchamente ovaladas, brillante, largas y tienen un pigmento verde en la época de verano el piñón deja caer sus hojas debido a que son caducas.



Figure 1. Planta de piñón (*J. Curcas*).
Fuente: (Info región, 2012).

Sistema Radicular

La forma de sus raíces está compuesta por una raíz central y rodeada por cuatro más (raíces proliferadas) pueden ser secundarias como terciarias. No es preferible sembrar en semilleros plásticos debido a su desarrollo de raíz ya que llegan a tener escamas. (INIAP, 2013; Alfonso, 2008).

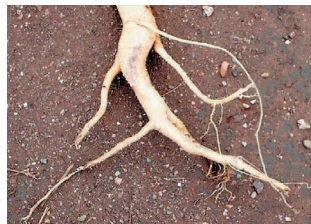


Figure 2. Raíz del Piñón (*J. Curcas*).
Fuente: (Alfonso, 2008).

Tallo

El tallo puede presentar un tallo vertical cilíndrico que tiene un pigmento verde o rojizo, que está dividido en; ramas largas (Solís, 2013), su principal caracteriza es que por no tiene una uniformidad en el desarrollo de sus tallos (Alfonzo, 2008)



Figure 3. Tallo del piñón (*J. Curcas*).
Fuente: (Peralta, 2016).

Hojas

Las hojas de Piñón forman laminas acorazonadas, son delgadas y tienen un color verde claro. En la época de verano siendo sus hojas caducas se ve en mayor cantidad los tallos sin hojas esto le favorece a la planta ya que puede ser más resistentes a épocas de sequía. (Alfonzo, 2008; INIAP, 2013).



Figure 4. Hoja del piñón (*J. Curcas*).
Fuente: (TRAMIL, 2017).

Flores

Las flores se caracterizan por tener una simetría radial. Existe diferencia de género de flores, en las flores masculinas los sépalos y los pétalos tienen 10 órganos y en las femeninas toman un tamaño grande después de la fecundación de óvulos. Estas flores son pequeñas de aproximadamente 6-8 mm (INIFAP, 2011; Alfonzo, 2008).



Figure 5. Flores del piñón (*J. Curcas*).
Fuente: (Solis, 2013)

Frutos

Los frutos tienen tres semillas de forma ovalada cuando están inmaduras tienen un olor verde cuando ya están maduras toman un color amarillo, llegan a medir de 1.5 - 4.0 cm. la maduración del fruto es de aproximadamente 55 a 90 días (Alfonzo, 2008). Sus semillas tienen forma de almendra (INIAP, 2013)



Figura 6. Frutos de *Jatropha curcas*.
Fuente: Redagricola.

4. Exigencias del Cultivo

4.1. Temperatura mínima y máxima, rango optimo

Crece adecuadamente en zonas tropicales y puede resistir a condiciones extremas. Requiere de climas soleados. Su cultivo es mejor cuando va de 0 a 800 metros sobre el

nivel del mar. La temperatura óptima para su desarrollo es de 25°C a 35°C (INIAP, 2013) (Alfonzo, 2008).

4.2. Fotoperiodo

El piñón precisa de 1500 horas /año de luz solar directa, ayuda al mejor desarrollo de la planta (INIAP, 2013).

4.3. Necesidad de agua

Para mejores condiciones de crecimiento se precisa una disponibilidad entre 400 mm y 120 mm, aunque también se encuentran adaptados para precipitaciones de 200 mm – 2000 mm al año, esta planta puede resistir a la sequía. (INIAP, 2013; Solís, 2013).

4.4. Exigencias de suelo

El piñón se lo puede cultivar en cualquier tipo de suelo profundo; franco arenoso a franco arcilloso, que estén bien preparados para que así su desarrollo sea continuo. El factor más importante para el adecuado desarrollo es el pH que esta entre 6.0 y 8.0 (Alfonzo, 2008).

5. Estadios Fenológicos

Tabla 1. Épocas de distintos estadios (Vázquez et al., 2014).

Estadio	Época
Defoliación	Noviembre
Reposo	Ocurre al final de otoño
Brotación vegetativa	Abril
Floración	Abril
Fructificación	Mayo, noviembre

6. Principales enfermedades y plagas

Por lo general las enfermedades y plagas pueden afectar al piñón ya que tiene un crecimiento inicial lento generando así dificultades en el desarrollo normal de la planta como pueden ser daños en las hojas y tallos provocados por ciertos insectos (Alfonzo, 2008; INIAP, 2013; Solís, 2013).

6.1. Insectos

Los insectos pueden afectar a este cultivo generando efectos negativos, como ejemplo están los gusanos, zompopos y grillos ya que se alimentan del follaje de la planta, también está la hormiga arriera y chinches que estas pueden afectar a su fruto y flor. Pueden existir

insectos que también pueden ser beneficiosos ya que se basa en el equilibrio de las poblaciones de plagas (Alfonso, 2008; INIFAP, 2011; INIAP, Proyecto Piñón para Galápagos, 2013).

6.2. Enfermedades

Al igual que los insectos que son amenazas para las plantas de piñón, así también existen enfermedades que pueden ser causar daños como pueden ser la mancha circular que esta presenta manchas amarillas en las hojas parecidas a pecas. Marchitez del fruto estos presentan ácaros con estructuras de hongos, otras enfermedades también pueden ser el Roya y antracnosis que provocan daño al follaje (Solís, 2013; Alfonso, 2008).

Plagas y enfermedades potenciales	
<i>Phytophthora</i> spp.	Pudrición de raíz
<i>Helminthosporium tetramera</i>	Manchas en hojas
<i>Calidea dregei</i>	Succionan frutos
<i>Spodoptera litura</i>	Larva se alimenta de hojas
Termitas e insecto dorado	Afectan toda la planta

6.3. Control de malezas

A este tipo de cultivo le puede llegar a afectar sustancias alelopáticas ya que estas no permiten que tenga un crecimiento continuo. Es recomendable realizar un control de plagas de forma manual al menos dos veces por año, es necesario realizar este proceso para así evitar la competencia de otros cultivos por agua, luz solar y espacio de desarrollo (INIFAP, 2011; INIAP, Proyecto Piñón para Galápagos, 2013).

7. Técnicas de cultivo

Para el cultivo de esta planta se necesitaría una buena preparación de terreno, verificación de condiciones óptimas necesarias para la siembra tomando en cuenta que esta especie puede resistir a condiciones extremas que se cultiva en zonas trópicas. El piñón si es sembrado a altas densidades producen menos a comparación de las plantas sembradas a una baja densidad (Alfonso, 2008; INIFAP, 2011).

Para la labranza es necesario tener un suelo homogéneo para no tener problemas al momento de lluvias, para este proceso de preparado del suelo el terreno necesariamente debe de ser preparado dos meses antes de las épocas de lluvias, es necesario tomar en cuenta la eliminación de maleza del terreno.

Cuando existen tierras en mal estado; secas o degradadas, el Piñón puede ser una solución para estas ya que sirve para la erosión del suelo. Para la siembra de este cultivo se recomienda al inicio de lluvias, la profundidad de siembra es de dos a tres centímetros en la capa húmeda del suelo. se debe de tomar en cuenta abonar al piñón ya que no hay este procedimiento la planta estará mal nutrida y muy factible a una baja producción. La humedad ayuda a la germinación de esta semilla (Alfonso, 2008; INIFAP, 2011; INIAP, 2013).

7.1. Sistema de riego

Es recomendable un riego diario antes que la germinación, para el sistema de riego es recomendable analizar el agua; la dureza, la turbidez, el color, pH (Alfonzo, 2008; Arias, 2010).

7.2. Poda

En esta planta *Jatropha curcas* se realiza por lo general para una buena producción, objetivos de la poda pueden ser para que facilite los labores del cultivo tanto para la cosecha y control de malezas, facilita la penetración de aire y luz, hace que la planta tenga una mejor forma y altura (INIAP, Proyecto Piñón para Galápagos, 2013). La poda se realizan a los 35 o 45 cm de altura (Arias, 2010).

En este cultivo la poda se la practica en la parte terminal de las plantas ya que ahí es donde su floración se produce más, para así también facilitar la penetración de luz del sol. Esta poda se la realiza en tiempo de luna nueva debido a los flujos de la savia que hacen efecto en cicatrizarlas. (Alfonso, 2008; INIAP, 2013; INIFAP, 2011; Solís, 2013).

7.3. Cosecha

La cosecha en varios casos se la realiza manualmente utilizando canastas plásticas, el fruto ya está listo cuando toma un color amarillo también cuando se presentan deshidratación. Para la cosecha del *Jatropha curcas* es preferible que se haga en zonas con temperatura ce 20 °C (Arias, 2010; INIFAP, 2011).

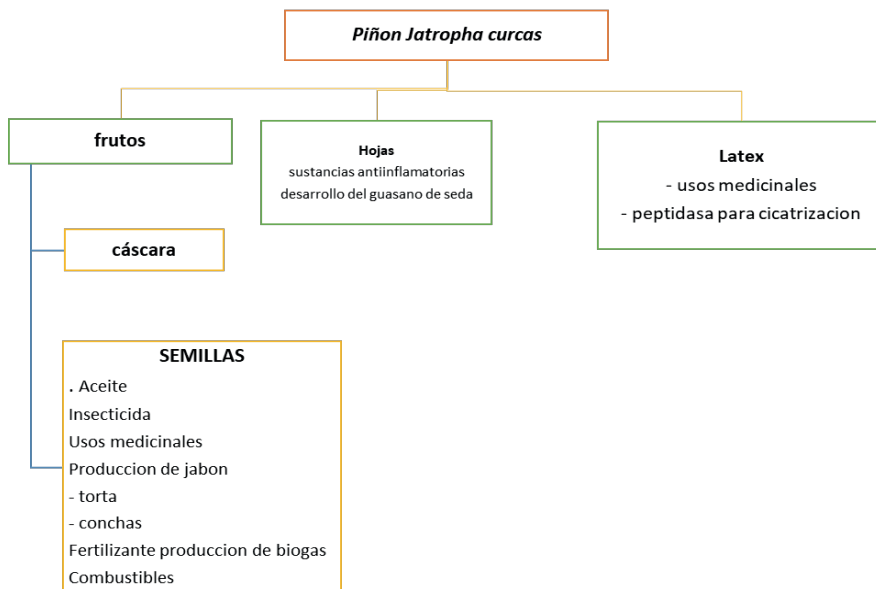


Figura 7. Aprovechamiento de la *Jatropha curcas*.
(Gaona, 2009) – Mapa conceptual adaptado por: Judith Acosta.

8. Comercialización

Este cultivo es beneficioso para obtener biodiesel, en que se realiza primero un proceso los cuales son el cultivo, recolección de semillas, extracción de aceite y conversión de aceite en biodiesel y proceder a obtener el producto para su venta (París, 2013).

9. Análisis económico

Se utiliza un análisis económico porque trata las diferencias de costos de tratamientos que proviene de ensayos agrícolas. El cultivo *Jatropha curcas* contribuye al desarrollo económico, ambiental y social ya que la materia prima es utilizada en la elaboración de aceites vegetales, que al mezclarlo con otros aceites se obtiene el combustible ecológico (Ávalos-Cerdas y Villalobos-Monge, 2018; Rengifo y Alvarez, s.f.). Considerando varios aspectos problemáticos por los que Ecuador debido a la comercialización de combustible fósiles se puede generar una alternativa de desarrollo, las cuales pueden ser el aprovechamiento del cultivo *Jatropha curcas* (Piñón) (Arias, 2010).

Costos aproximados para el establecimiento en monocultivo de Piñón por hectárea. (Rucoba y Munguía Gil, 2013).

Concepto	Valor estimado USD \$
Chapeo (jornales)	400
Hacer cepas (jornales)	1500
Aplicación de herbicidas (jornales)	400
Costo del producto	400
Establecimiento de la plantación	1000
Costo de plántulas (1 6666 plantas)	25000
TOTAL	28 700

Costos de manejo de la plantación. (Rucoba y Munguía Gil, 2013).

Concepto	Valor estimado USD \$
Aplicación de herbicidas	400
Costo herbicida	400
Podas (jornales)	1000
Total	1800

Tabla 2. Costos variables de producción de aceite de *J. curcas* (MRE: Mantenimiento, recolección y extracción. Costos en Dólares).

año	Prensa manual			Prensa mecánica			
	Rubro	Costo unitario	Costo total	Rubro	Costo unitario	Costo total	
1	Vivero	\$199,920	\$2,059,920	Vivero	\$199,920	\$2,059,920	
	Preparar la tierra	\$280,000		Preparar la tierra	\$280,000		
	Trasplante	\$140,000		Trasplante	\$140,000		
	Fertilizante	\$690,000		Fertilizante	\$690,000		
	Control de maleza	\$645,000		Control de maleza	\$645,000		
	Poda	\$105,000		Poda	\$105,000		
2	Fertilizante	\$690,000	\$1,000,000	Fertilizante	\$690,000	\$1,000,000	
	Control de maleza	\$170,000		Control de maleza	\$170,000		
	Poda	\$140,000		Poda	\$140,000		
3	Fertilizante	\$628,000	\$1,638,000	Fertilizante	\$628,000	\$1,488,000	
	Control de maleza	\$170,000		Control de maleza	\$170,000		
	Poda	\$140,000		Poda	\$140,000		
	Cosecha manual	\$350,000		Cosecha manual	\$350,000		
	Extracción	\$350,000		Extracción	\$200,000		
4	MRE	\$1,638,000	\$1,638,000	MRE	\$1,488,000	\$1,488,000	
5	MRE	\$1,638,000	\$1,638,000	MRE	\$1,488,000	\$1,488,000	
6	MRE	\$1,638,000	\$1,638,000	MRE	\$1,488,000	\$1,488,000	
7	MRE	\$1,638,000	\$1,638,000	MRE	\$1,488,000	\$1,488,000	
8	MRE	\$1,638,000	\$1,638,000	MRE	\$1,488,000	\$1,488,000	
9	MRE	\$1,638,000	\$1,638,000	MRE	\$1,488,000	\$1,488,000	
10	MRE	\$1,638,000	\$1,638,000	MRE	\$1,488,000	\$1,488,000	
Sub total costos variables			\$16,163,920	Sub total costos variables			\$14,963,920

Bibliografía

- Alfonzo, J. (2008). *Manual para cultivo de piñón (Jatropha curcas) en Honduras*. Obtenido de Centro de comunicacion Agricola de la Fundacion Hondureña de Investigacion Agricola (FHIA): https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/gota_verde_jatropha_curcas_manual_es.pdf [Consultado: 16/11/2019].
- Arias, A. (2010). *Estudio de factibilidad para la creacion de una productora y comercializadora de semillas de piñón para la elaboraci3n de biocombustible en el Ecuador*. Obtenido de Poyecto final Ecotec: https://www.ecotec.edu.ec/documentacion/investigaciones/estudiantes/trabajos_de_grado/2150_2010_CEE_AAARIAS_07.pdf [Consultado: 21/11/2019].

- INIAP. (2013). Proyecto Piñón para Galápagos. Obtenido de Manual de buenas prácticas agrícolas del cultivo de piñón (*Jatropha curcas*).
- INIFAP. (2011). *Guía técnica para la producción de piñón Mexicano (Jatropha curcas L.) en Michoacán*. Obtenido de Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP): <https://pdfs.semanticscholar.org/85fa/0f2e4d85ca2a1ce39b5591beb2107f27a7eb.pdf> [Última consulta: 14/11/2019].
- Ávalos-Cerdas, J.M., Villalobos-Monge, A. (2018). Análisis económico: un estudio de caso en *Jatropha curcas* L. mediante la metodología de presupuestos parciales. *Agron. Mesoam.*, 29(1), 95-104. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.27901>
- Rengifo, V., Alvarez, F. (s.f.). Proyecto de inversion para la elaboracion y comercializacion de Biodiesel a partir de la planta *Jatropha curcas* en el Ecuador: [https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/16193/1/Proyecto de Inversión para la elaboración y comercialización de Biodiesel a partir de la planta *Jatropha Curcas* en el Ecuador.pdf](https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/16193/1/Proyecto%20de%20Inversi%C3%B3n%20para%20la%20elaboraci%C3%B3n%20y%20comercializaci%C3%B3n%20de%20Biodiesel%20a%20partir%20de%20la%20planta%20Jatropha%20Curcas%20en%20el%20Ecuador.pdf) [Consultado: 20/11/2019].
- Solís, J. (2013). *Jatropha curcas* L. *Alternativa Bioenergética en Mexico*. Obtenido de INIFAP-Instituto Nacional de investigaciones forestales Agrícolas y Pecuarias: https://www.researchgate.net/publication/294873398_Jatropha_curcas_L_Alternativa_Bioenergetica_en_Mexico/citation/download [Consultado:22/11/2019].
- Vázquez, A., Valdés, O., Perez, E. (2014). *Manual de buenas practicas para el cultivo de Jatropha curcas L.* Obtenido de Fenología de *Jatropha curcas* L. en condiciones de trópico sub-húmedo: https://www.researchgate.net/publication/293817689_Fenologia_de_Jatropha_curcas_L_en_condiciones_del_tropico_sub-humedo [Consultado: 19/11/2019].
- Solís, J. (2013). *Jatropha curcas* L. *Alternativa Bioenergética en Mexico*. Obtenido de INIFAP-Instituto Nacional de investigaciones forestales Agrícolas y Pecuarias: https://www.researchgate.net/publication/294873398_Jatropha_curcas_L_Alternativa_Bioenergetica_en_Mexico [Consultado: 18/12/2019].
- Peralta, M. (2016). *Piñón de leche*. Obtenido de Árboles y flores en República Dominicana: <https://arbolesyfloresmarilin.wordpress.com/2016/02/28/pinon-de-leche/> [Consultado: 18/12/19].
- Rucoba, A., Munguía Gil, A. (2013). Rentabilidad de *Jatropha curcas* en asociación con cultivos y monocultivo en tierras de temporal en Yucatán. *Revista mexicana de agronegocios*, 33, 565-575. <https://www.redalyc.org/pdf/141/14127709016.pdf>

Cuadernos de la Red IBEROMASA

Optimización de los procesos de extracción de biomasa sólida para uso energético

PARTE B

Mejora de procesos de aprovechamiento energético de biomasa

Ethanol from green coconut fiber using alkaline combined steam explosion pretreatment

Vitor Troccoli Ribeiro, Willyan Araújo da Costa,
Amanda Castro Campolina, Everaldo Silvino dos Santos*

Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte,
Av. Sen. Salgado Filho, 3000, 59078-970, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.

*Autor para correspondencia: everaldo@eq.ufrn.br

1. Introduction

Currently, the search for diverse sources of energy is mainly due to the high demand that aims to guarantee the world economic development. Global gross domestic product (GDP) growth is projected to grow by 3.4% per year between 2016 and 2040, while world population will increase by an average of 0.9% per year from 7.4 billion to 9.1 billion in the same period, leading to a 30% increase in world primary energy demand by 2040 (US Energy Information Administration, 2017). About 80% of this demand is currently supplied by non-renewable primary energy sources such as oil, coal and natural gas. These fuels are major sources of CO₂ emissions, being one of the “greenhouse effect” gases, causing the planet’s temperature rise and climate change (U.S. Energy Information Administration, 2017).

In this context, renewable energy sources (Machado et al., 2010), over the years, have gained greater importance in both Brazil and the global energy matrix, as they are less harmful to the environment and present a viable alternative to fuel consumption of fossil origin. Among renewable energy sources biomass is the most researched, surpassing, for example, solar, wind, hydro and geothermal together. Lignocellulosic biomass is a renewable and abundant source of raw material that can be used in the production of liquid and gaseous fuels, as well as in the manufacture of thermochemical products, among others (Naik et al., 2010).

Brazil has about 250 thousand hectares of areas for the cultivation of coconut trees and it is estimated that the production is around 2 million tons of fruits. Much of the cultivated area is intended for the production of coconut water, where the green coconut shell makes up about 80% of the waste generated on the beaches of northeast of Brazil

(Gonçalves et al., 2015). The abundance of green coconut in Brazil, and in several other tropical countries, makes this lignocellulosic material a potential raw material for the production of second generation ethanol, and the use of this type of residue can lead to a reduction of its environmental impact. In Brazil, the use of green coconut fiber is focused on obtaining agricultural substrate, which allows the development of the root system, playing a supporting role for the plant (Silva, 2014).

When it comes to ethanol production from lignocellulosic biomass, the new processes are one of the most innovative technologies under development and could potentially result in a significant increase in biofuel production, resulting in a range of other byproducts, considered to be biomass compounds of added value within the concept of biorefineries (Menon & Rao, 2012).

However, many physicochemical, structural and compositional factors associated with biomass contribute to the complexity and consequent economic unfeasibility of conversion processes if the process is not properly developed. One of the technological routes that has received a lot of attention, mainly due to the development potential linked to modern biotechnology, is the enzymatic route, which happens under mild temperature conditions and provides high specificity reactions, which results in high yields and low production of undesirable products. For this route the biomass pretreatment processes are considered fundamental, since there is a need to change and / or remove structural and compositional impediments for the hydrolysis step, enabling the improvement of the enzymatic hydrolysis rate and the increase in yield of sugars from cellulose (Ojeda & Kafarov, 2009).

Pretreatment plays a key role in enzymatic hydrolysis of lignocellulosic materials. The main importance is to ensure the access of cellulolytic enzymes to the cellulose substrate and the crystalline part of the polymer, as well as to decrease the amount of enzyme needed for hydrolysis (Pitarelo, 2007). Pretreatment also has a great influence on the crystalline structure of cellulose and usually aids in the degradation of the crystalline parts.

Effective pretreatment is characterized by several criteria, among which stand out: the need to reduce the size of the biomass particles, to limit the formation of compounds that inhibit the growth of fermentative microorganisms, to minimize the energy demand. These factors, including low pretreatment reagent cost, recyclability, and the generation of high added value co-products, provide a basis for comparing the various pretreatment options (Rubik, 2013).

Pretreatments act by disrupting the lignocellulosic matrix, reducing the amount of lignin and hemicellulose and modifying the cellulose crystallinity, making it more susceptible to enzymatic attack (Silverstein et al., 2007). It is also noteworthy that besides the cellulose-rich pretreated biomass, the liquid fraction produced is rich in other carbohydrates, mainly pentoses, which can also be used to produce ethanol. In addition, lignin may be recovered for use in the production of energy or other compounds in the biorefinery concept (Luo et al., 2010).

Physical pretreatments are those characterized by the fragmentation of the material through mechanical action, either by grinding, grinding or crumbling, or by the absence of chemical reagents in the process, such as irradiation and steam explosion (Szczo drak & Fiedurek, 1996). On an industrial scale, physical pre-treatments such as milling and irradiation become unviable for their high cost (Alvira et al., 2016).

A highly efficient pretreatment for hemicellulose removal that increases the particle area for enzyme action is steam explosion. In this pretreatment, the material is subjected to temperatures of 160 to 240°C and pressures of 5 to 20 kg_f/cm² and, after a short time of 2 to 30 minutes, the material is abruptly decompressed (Mosier et al., 2005). During the reaction, the vapor penetrates the lignocellulosic material, and inside it condenses into liquid water. After the reaction, an explosive decompression follows, where water is rapidly evaporated, thus causing destruction of the biomass structure. The process causes partial hydrolysis of hemicelluloses and lignin, and the defibrillation of cellulose bundles, which results in increased accessibility by enzymes in these structures, facilitating hydrolysis and subsequent fermentation (Chen et al., 2014; Singh et al., 2014).

Some well-known pretreatment processes other than steam explosion are catalyzed or non-catalyzed hydrothermal process, acid hydrolysis, alkaline pretreatment, etc. There is a consensus in the scientific community that there will not be a single pretreatment that will be applied to all types of biomass and objectives. Instead, different pretreatments or combinations of different pretreatments can be used according to specific needs (Saddler & Kumar, 2013).

In this context, the present study aims to evaluate the influence of explosion pretreatment alone or combined with an alkaline pretreatment on the enzymatic hydrolysis yield from green coconut shell fiber. In addition, for the best pretreatment, ethanol production using the Saccharification and Simultaneous Fermentation (SSF) process using the *Saccharomyces cerevisiae* PE-2 and *Saccharomyces cerevisiae* CAT-1 yeasts in fermentation with different solids loads is evaluated.

2. Material and methods

2.1. Obtaining and preparing the raw material

The green coconut used was kindly provided by the company Aqua Coco, located in Maxaranguape, Rio Grande do Norte, Brazil. The coconut epicarp and mesocarp were used to obtain the green coconut shell fiber. The fiber was washed with dewatering tap water and dried in a tray oven at 65°C for 72 hours. After drying, the fiber was ground (Willye mill, TE-680, Tecnal®) and sieved with 20 mesh size, as shown in Figure 1, and then stored in plastic containers at room temperature.



Figure 1. Crushed and sifted green coconut biomass.

2.2. Steam explosion pretreatment

For steam explosion pretreatment, 100 grams of the dried coconut was added to a 14 L reactor (219 x 280 x 8 mm, UpControl, Brazil) and steam blast was performed at different temperatures (140, 175 and 210 °C) at a fixed time of 10 minutes, so as to have different severity factor (R_o) estimated according to Eq. (1). Distilled water was used to generate steam. After pretreatment, the sample was washed with 2 L of hot water for 30 minutes and dried at 60 °C for 24 hours. In addition to temperature, the influence of biomass humidification was evaluated. Under the same temperature and time conditions, 100 grams of the dried coconut was mixed with 1 L of water at room temperature for 24 hours to be further placed in the equipment.

The severity factor is based on the effects provided by time and temperature on the pretreatment and is estimated according to Eq. (1):

$$R_o = \log \left[\int_0^t \exp \left(\frac{T - 100}{14.75} \right) dt \right] \quad (1)$$

Being:

R_o = severity factor.

t = pretreatment residence time (min).

T = pretreatment temperature (°C).

100 = reference temperature (°C).

14.75 = empirical parameter related to activation energy.

The severity factors for temperatures of 140, 175 and 210 °C for the 10-minute time are, respectively, 2.18, 3.21 and 4.24.

2.3. Alkaline pretreatment

Alkaline pretreatment was performed by applying 2% (w/v) NaOH solution at 10% (w/v) solids of green coconut fiber pretreated by steam explosion. The suspension was autoclaved at 121 °C within 1 hour. The biomasses were then washed with distilled water and filtered to neutral pH. They were then dried at 60 °C for 24 hours.

2.4. Characterization of the untreated and pretreated fibers

The contents of cellulose, hemicellulose, lignin, extractables and ashes were obtained according to the NREL protocol (Sluiter et al., 2008).

The surfaces of untreated and pretreated biomasses were visualized by scanning electron microscopy (SEM) (Phillips XL - 30ESEM, USA).

2.5. Enzymatic hydrolysis

The enzymatic hydrolysis of untreated and pretreated coconut fiber was performed according to Nogueira et al. (2018). The solids load for enzymatic hydrolysis was 5% (m/v) with enzymatic load of 20.0 FPU/g, 20.0 CBU/g and 10.0 FXU/g fiber. In 250 mL Erlenmeyers together with the solids, sodium citrate buffer (50.0 mM, pH 4.8) was added along with a 0.01% (w/v) sodium azide solution to prevent microbial growth and contamination during

hydrolysis. Assays were performed in a rotary incubator at 150 rpm, 50 ° C for 72 hours. The collected samples were taken to the boiling water bath for 5 minutes to inactivate the enzymes and finish the reaction. Then the samples were centrifuged at 10,000 rpm for 15 minutes. Then the samples were centrifuged at 10,000 rpm for 15 minutes. The liquid fraction was filtered on 20.0µm membranes and stored at -20 °C for determination of sugars by the DNS method (Miller, 1959). Samples were performed in duplicate.

2.6. Fermentation

The microorganisms *Saccharomyces cerevisiae* PE-2 and *Saccharomyces cerevisiae* CAT-1 were used for ethanol production and were kept in glycerol at the Biochemical Engineering Laboratory (LEB) at the Federal University of Rio Grande do Norte (UFRN). For inoculum preparation, the microorganisms were transferred to Petri dishes containing potato dextrose agar (PDA) and cultured at 30 °C for 24 hours. The strains were grown in 250 mL Erlenmeyer flasks with 100.0 mL of sterile culture medium containing: 50.0 g/L glucose; 1.0 g/L (NH₄)₂SO₄; 0.5 g/L KH₂PO₄; 0.25 g/L MgSO₄; 10.0 g/L yeast extract; 10.0 g/L peptone and incubated at 30 °C on an orbital shaker for 24 hours at 150 rpm until 0.8 x 10⁸ cells/mL. The medium was inoculated with a volume corresponding to 10% of this suspension.

The fermentation technique used for ethanol production was saccharification and simultaneous fermentation (SSF) which was performed in Erlenmeyer flasks. In this case, the pretreated biomass that presented the best concentrations of fermentable sugars among the evaluated pretreatments was used according to the standard NREL procedure (Dowe & Mcmillan, 2001). SSF experiments were performed with different concentrations of pretreated solids, with values of 5, 10 and 15% (w/v) with 48.0 mL of sodium citrate buffer (50.0 mM, pH 5.0), enzymatic load of 20.0 FPU (Cellic CTec 2 enzyme kit) per gram of pretreated material supplemented with: 1.0 g/L (NH₄)₂SO₄; 0.5 g/L KH₂PO₄; 0.25 g/L MgSO₄; 2.0 g/L yeast extract; 1.0 g/L peptone (Alves dos Santos et al., 2010). SSF experiments were initiated by the addition of enzymes and microorganism, incubated at 40 °C on orbital incubator at 150 rpm. Samples were taken after 48 hours. Ethanol and sugar concentrations were determined by HPLC.

The ethanol yield was calculated according to Eq. (2):

$$\text{Ethanol yield (\%)} = \left(\frac{\text{Ethanol} \times 100}{[\text{Glucose liquor} - \text{Glucose biomass}] \times 0.511} \right) \quad (2)$$

Glucose liquor (g) is the glucose mass in the liquor, Glucose biomass (g) refers to the mass of glucose from biomass considering the conversion factor of cellulose to glucose equal to 0.9, and Ethanol (g) is the ethanol mass produced in the SSF. The conversion factor of glucose to ethanol was 0.511.

2.7. High performance liquid chromatography (HPLC)

The samples were centrifuged and filtered by quantifying sugars and ethanol. Chromatographic separation was performed using the Shim-Pack SCR-101H column (300x7.8 mm, Shimadzu, Japan) coupled to Shimadzu chromatographer equipped with

refractive index detector under the following conditions: 0.005 mol/L of sulfuric acid mobile phase, flow 0.6 mL/min and column temperature 65 ° C. The injected volume was 20.0 µL.

3. Results and discussions

3.1. Characterization of the untreated biomass

The lignocellulosic composition of untreated green coconut in terms of cellulose, hemicellulose, lignin, extractables and ash content was analyzed according to NREL protocols. The chemical composition is shown in Table 1. The untreated coconut fiber had 27.68% cellulose and 15.45% hemicellulose showing a high lignin content (32.64%). These results are in agreement with those reported Gonçalves et al. (2014) and Nogueira et al. (2018). In general, the chemical composition of this biomass is suitable for ethanol production.

3.2. Effect of the steam explosion and humidification on biomass

The purpose of pretreatment is to alter the chemical composition of the material by removing or dissolving lignin and hemicellulose, and reducing the crystallinity of the cellulose. The results of biomass chemical composition after pre-treatments are presented in Table 1. It was observed that steam explosion pretreatment showed a low cellulose enrichment and it was favored by a higher severity factor. In this case, the highest temperature (210 °C) provided a higher percentage of cellulose (34.61%) and lower hemicellulose (11.29%) were obtained when compared to the lower temperatures. The lignin content was practically constant, thus justifying the use of a combined pretreatment. In this case, an alkali pretreatment favors the delignification of green coconut fiber. The fiber humidification process showed chemical composition similar to dry fiber when using steam explosion. According to the literature, the initial moisture content of biomass has a strong impact on the recovery of lignin, cellulose and hemicellulose. High biomass moisture content decreases kinetics as voids in the biomass are filled with condensate before the vapor temperature is reached (Lam et al., 2011). In the present study, no significant changes were observed between the dry and wet biomass experiments.

3.3. Effect of steam explosion pretreatment combined with alkaline one

Alkaline pretreatment with NaOH was carried out with the steam explosion pretreated biomass at 210 °C to enrich the cellulosic content. The result of using this combined pretreatment is presented in Table 1. In this case, the cellulose content was 43.16%, hemicellulose 20.24% and lignin 22.44%. Thus, a 24.7% increase in cellulose content and a 29.2% reduction in lignin content were observed.

3.4. SEM analysis for the biomasses

The images obtained from SEM for untreated and pretreated biomasses are presented in Figure 2. The untreated green coconut fiber sample showed rigid and well-ordered surfaces (Figure 2A). Figures 2B and 2C show that for pretreated biomass it is possible to observe modified structures, with increased surface area and porosity and disordered fibers. In Figure 2C, where there was the combined pretreatment, these characteristics are

more pronounced than in biomass where only steam explosion was used (Figure 2B). These structural characteristics will provide greater susceptibility of pretreated green coconut fiber to enzymatic hydrolysis.

Table 1. Chemical composition of untreated and pretreated biomass

Condition	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)	Extractables (%)	Ashes (%)
Untreated	27.68 ± 0.52	15.45 ± 1.02	32.64 ± 1.05	21.92 ± 0.41	2.71 ± 0.15
2.17* (140 °C)	29.73 ± 0.38	16.53 ± 0.59	30.83 ± 1.08	9.17 ± 0.35	1.36 ± 0.09
3.2* (175 °C)	30.55 ± 0.85	13.34 ± 0.47	32.81 ± 0.55	8.85 ± 0.25	1.64 ± 0.15
4.23* (210 °C)	34.61 ± 0.42	11.29 ± 0.89	31.69 ± 0.54	6.76 ± 0.27	2.39 ± 0.17
2.17 + hum.	28.95 ± 0.46	15.43 ± 0.77	31.87 ± 0.64	9.25 ± 0.25	1.42 ± 0.12
3.21 + hum.	31.58 ± 0.88	13.28 ± 0.68	31.38 ± 0.25	8.75 ± 0.17	1.53 ± 0.16
4.23 + hum.	33.52 ± 1.04	11.42 ± 0.58	31.53 ± 0.28	6.42 ± 0.28	2.21 ± 0.19
2.17 + AT	43.16 ± 0.54	20.24 ± 0.97	22.44 ± 0.75	1.16 ± 0.05	1.43 ± 0.11

(*) Severity factor; hum. – Humidification; AT – Alkali treatment.

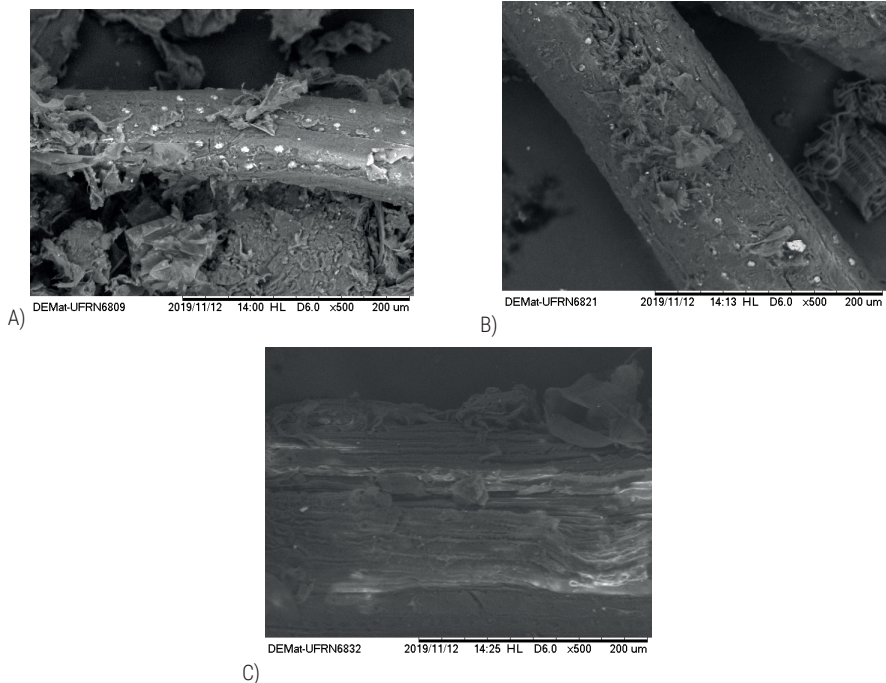
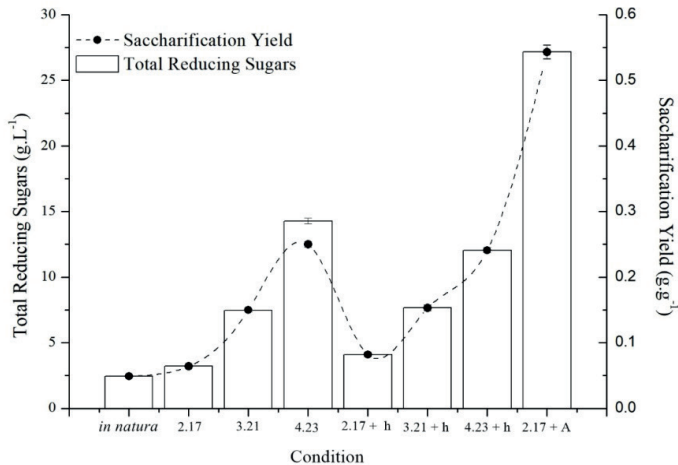


Figure 2. Fiber images by SEM untreated biomass (A), pretreated at 210 °C (B) and combined with alkaline (C).

3.5. Enzymatic hydrolysis of biomass

Enzymatic hydrolysis was performed on untreated biomass, steam explosion pretreated and combined with alkaline pretreatment. The results of reducing sugars and saccharification yield are shown in Figure 3. Reduced values for fermentable sugars were obtained by using the untreated biomass, probably due to the high lignin content and the low enzymatic accessibility, when compared to those presented by the pretreated biomasses. For the condition of higher severity (210 °C) and without humidification, the highest production of fermentable sugars (14.28 g/L) and yield (0.25 g/g pretreated material) was observed. It can be seen that the combined pretreatment strategy was successful as sugar production was 27.17 g/L with yield 0.54 g/g, almost two-fold that found when the steam explosion pretreatment alone was used. This was possible because with alkaline pretreatment, the material was delignified, making the cellulose more susceptible to the action of enzymes.



Note: The letter "h" denotes humidification and letter A means Alkali.

Figure 3. Concentration of total reducing sugars and saccharification yield in biomass hydrolysis.

3.6. Saccharification and simultaneous fermentation (SSF)

The strategy used for ethanol production was by SSF using *Saccharomyces cerevisiae* PE-2 and *Saccharomyces cerevisiae* CAT-1 yeasts. The biomass selected for the fermentation was the one that obtained the best results in enzymatic hydrolysis in terms of fermentable sugars and saccharification yield, i.e., the steam explosion pretreated biomass at 210 °C combined with alkaline pretreatment. In addition to the different microorganisms, fermentation with different solids loads was also evaluated.

Ethanol concentration and yield results for *Saccharomyces cerevisiae* PE-2 are shown in Figure 4 and for *Saccharomyces cerevisiae* CAT-1 in Figure 5.

Ethanol concentration and productivity were higher for higher solids loading. For *S. cerevisiae* PE-2, the obtained ethanol concentrations were 5.61 g/L, 18.52 g/L and 23.62 g/L, for solids loads of 5, 10 and 15%, respectively. Using *S. cerevisiae* CAT-1 yeast the ethanol concentrations obtained were 4.23 g/L, 12.93 g/L and 19.65 g/L for solids loads of 5, 10 and 15.0%, respectively.

As shown in Figure 6, *S. cerevisiae* PE-2 obtained better ethanol yields than *S. cerevisiae* CAT-1, reaching 81.39% using 10% solids loading.

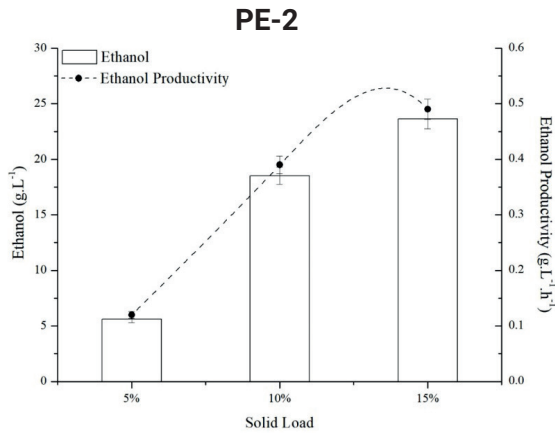


Figure 4. Ethanol concentration and productivity in SSF with different solids loads using *Saccharomyces cerevisiae* PE-2.

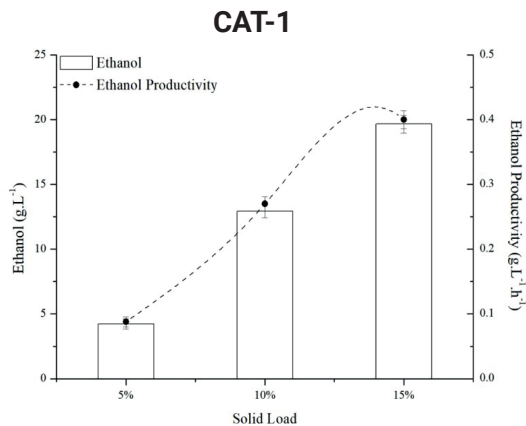


Figure 5. Ethanol concentration and productivity in SSF with different solids loads using *Saccharomyces cerevisiae* CAT-1.

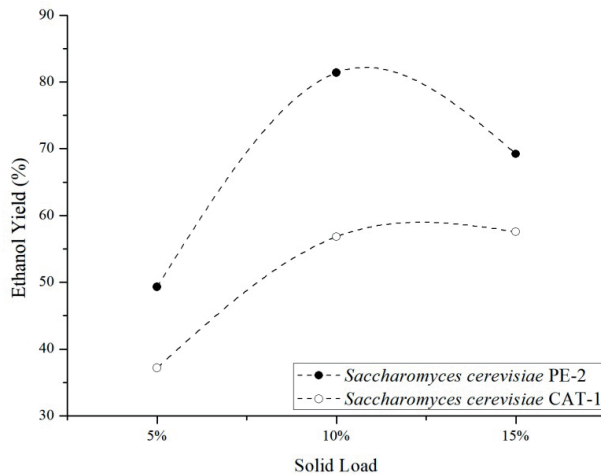


Figure 6. Ethanol yield for SSF using two yeasts with different solids loads.

4. Conclusions

The present study showed the use of green coconut shell fiber as a promising biomass in ethanol production. The effect of steam explosion pretreatment with dry and wet biomass showed that humidification did not influence the biomass composition as well as did not influence the enzymatic hydrolysis step. Steam explosion pretreatment at 210 °C for 10 minutes followed by alkaline pretreatment favored the production of fermentable sugars reaching 27.17 g/L with 0.54 g/g yield. *Saccharomyces cerevisiae* PE-2 showed better fermentation results when compared to *S. cerevisiae* CAT-1. In this case, for the former an ethanol yield of 81.38% could be achieved by using 10% solids loading.

References

- Alves dos Santos, J.R., Souto-Maior, A.M., Gouveia, E.R., Martín, C. (2010). Comparação entre processos em shf e em ssf de bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol por *Saccharomyces cerevisiae*. *Química Nova*, 33(4), 904-908. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000400027>
- Alvira, P., Negro, M.J., Ballesteros, I., González, A., Ballesteros, M. (2016). Steam Explosion for Wheat Straw Pretreatment for Sugars Production. *Bioethanol*, 2, 66-75. <https://doi.org/10.1515/bioeth-2016-0003>
- Chen, H., Li, G., Li, H. (2014). Novel pretreatment of steam explosion associated with ammonium chloride preimpregnation. *Bioresource Technology*, 153, 154-159. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.025>

- Dowe N., Mcmillan, J. *SSF experimental protocols - lignocellulosic biomass hydrolysis and fermentation. NERL analytical procedure*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 2001.
- Gonçalves, F.A., Ruiz, H.A., Dos Santos, E.S., Teixeira, J.A., De Macedo, G.R. (2015). Bioethanol production from coconuts and cactus pretreated by autohydrolysis. *Industrial Crops and Products*, 77, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.06.041>
- Gonçalves, F.A., Ruiz, H.A., Nogueira, C.D.C., Santos, E.S. Dos, Teixeira, J.A., De Macedo, G.R. (2014). Comparison of delignified coconuts waste and cactus for fuel-ethanol production by the simultaneous and semi-simultaneous saccharification and fermentation strategies. *Fuel*, 131, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.021>
- Lam P.S., Sokhansanj S., Bi X., Lim C.J., Melin S. (2011). Energy input and quality of pellets made from steamexploded Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*). *Energy and Fuels* 25(4), 1521-1528. <https://doi.org/10.1021/ef101683s>
- Luo, L., van der Voet, E., Huppel, G. (2010). Biorefining of lignocellulosic feedstock - Technical, economic and environmental considerations. *Bioresource Technology*, 101, 5023-5032. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.109>
- Machado, A.V., Oliveira, E.L., Santos, E.S., Oliveira, J.A. (2010). Cashew-nut (*Anacardium occidentale* L.) drying study using solar dryer with direct radiation. *Información Tecnológica*, 21, 31-37. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642010000100006>
- Menon, V., Rao, M. (2012). Trends in bioconversion of lignocellulose: Biofuels, platform chemicals & biorefinery concept. *Progress in Energy and Combustion Science* 38(4), 522-550. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.02.002>
- Miller, G.L (1959). Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*, 31(3): 426-428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>
- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y.Y., Holtzapfel, M., Ladisch, M. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 96(6), 673-686. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.06.025>
- Naik, S., Goud, V.V., Rout, P.K., Jacobson, K., Dalai, A.K. (2010). Characterization of Canadian biomass for alternative renewable biofuel. *Renewable Energy*, 35, 1624-1631. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.033>
- Nogueira, C.C., Padilha, C.E.A., Leitão, A.L.S., Rocha, P.M., Macedo, G.R., Santos, E.S. (2018). Enhancing enzymatic hydrolysis of green coconut fiber-Pretreatment assisted by tween 80 and water effect on the post-washing. *Industrial crops and products*, 112, 734-740. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.12.047>
- Ojeda, K., Kafarov, V. (2009) Exergy analysis of enzymatic hydrolysis reactors for transformation of lignocellulosic biomass to bioethanol. *Chemical Engineering Journal*, 154, 390-395. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.05.032>
- Pitarello, A.P. (2007). *Avaliação da Susceptibilidade do Bagaço e da Palha de Cana-de-Açúcar à Bioconversão via Pré-Tratamento a Vapor e Hidrólise Enzimática*. Dissertação de Mestrado-UFPR, Curitiba-PR.
- Rubik, D.F. (2013). *Pré-tratamento de biomassa lignocelulósica para facilitar a hidrólise enzimática visando à produção de bioetanol 2G*. Dissertação, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau/SC.

- Saddler, J., Kumar, L. (2013). Special Issue from the NSERC Bioconversion network workshop: pretreatment and fractionation of biomass for biorefinery/biofuels. *Biotechnology for Biofuels* 6(1), 17. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-17>
- Silva, A.C. da. (2014). Reaproveitamento da casca de coco verde. *Revista Monografias Ambientais*, 13(5), 4077-4086. <https://doi.org/10.5902/2236130815186>
- Silverstein, R.A., Chen, Y., Sharma-Shivappa, R.R., Boyette, M.D., Osborne, J. (2007). A comparison of chemical pretreatment methods for improving saccharification of cotton stalks. *Bioresource Technology*, 98(16), 3000-3011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.10.022>
- Singh, R., Shukla, A., Tiwari, S., Srivastava, M. (2014). A review on delignification of lignocellulosic biomass for enhancement of ethanol production potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32(C), 713-728. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.051>
- Sluiter, A., Ruiz, A., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D. (2008). Determination of Extractives in Biomass: Laboratory Analytical Procedure (LAP); Issue Date 7/17/2005 - 42619.pdf. Technical Report NREL/TP-510-42619.
- Szczodrak, J., Fiedurek, J. (1996). Technology for conversion of lignocellulosic biomass to ethanol. *Biomass and Bioenergy*, 10(5-6), 367-375. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00114-X](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00114-X)
- U.S. Energy Information Administration. (2017). <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>

Modelo de uso de biomasa para la generación de electricidad

Napoleón Blanco*

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Electrotecnia y Computación, Universidad Nacional de Ingeniería, Nicaragua.

*Autor para correspondencia: blanco.napoleon@fec.uni.edu.ni

1. Introducción

El uso de los recursos energéticos biomásicos en Nicaragua se ha basado sustancialmente en la explotación de la leña y el carbón con destino de uso doméstico primordialmente; la participación mayoritaria de la biomasa en el uso de la energía es en la forma leña (97.5%), siendo minoritario el empleo en otras energías comerciales (2.4%) y de consumo doméstico como Gas Licuado de Petróleo (GPL) con un 2.5% (Multiconsult., 2006). Lo anteriormente expuesto, ha causado un uso ineficiente de la biomasa y una presión ambiental representada por la deforestación de gran parte del territorio nacional.

Por otra parte, sigue latente el problema de la importación de los energéticos derivados del petróleo de los países centroamericanos, incluido Nicaragua, cuyo consumo crece llegando a representar un gran porcentaje de las importaciones factura petrolera regional (CEPAL, 2008), lo que contribuye a debilitar sustancialmente las economías de estos países. De forma que, la utilización racional de los recursos energéticos importados, así como el desarrollo de recursos nacionales alternativos, se ha hecho cada vez más necesario en vista de las distorsiones provocadas en los esquemas productivos de las economías del istmo centroamericano. Además, debemos reconocer que Centroamérica es "tomadora de tecnología", es decir, utiliza la tecnología y los bienes de capital que producen los países industrializados, lo que también está determinando sus patrones de consumo de energía (Selva y Umaña, 1988).

De forma que, en Nicaragua la mejor solución al tema de uso de recursos energéticos energético pasaría por una planificación y provisión diversificada, donde todas las fuentes no convencionales como la biomasa contribuyan a la generación eléctrica (en forma complementaria a los sistemas tradicionales) en la proporción que, económica y geopolíticamente, resulten más conveniente para el País.

2. Empleo de la biomasa en forma de bagazo para la generación de Energía Eléctrica

Para generar energía eléctrica a partir del bagazo de la caña es necesario el empleo de sistemas térmicos complejos debido al bajo poder calórico de este tipo de biomasa y por su alto porcentaje de humedad. De forma que, para el empleo de bagazo de caña como energético se necesita de plantas de generación con grandes calderas y volúmenes de hogar, resultando mayores que si emplearan combustibles convencionales lo que provoca un aumento considerable de las inversiones requeridas para el uso de este recurso energético.

No obstante, la aplicación de la biomasa sólida para la generación de energía eléctrica contribuye a la robustez de la red de distribución por que este tipo de energético tiene la capacidad de proporcionar al sistema eléctrico garantía de suministro a cualquier hora del día y con diferentes condiciones meteorológicas producto de la posibilidad de almacenamiento del energético y de la planeación de su empleo (Cerde, 2012).

En Nicaragua, la biomasa sólida en forma de bagazo de caña es empleada como recurso energético en los ingenios azucareros San Antonio, Monte Rosa, CASUR y Monte Limar que son agentes del mercado eléctrico y están conectados al Sistema interconectado Nacional (SIN). Los ingenios antes mencionados generan energía eléctrica para autoconsumo y venta al mercado nacional e internacional a través de la interconexión del país con toda Centroamérica desarrollando un proceso productivo complementario al de alimentos y energía.

A continuación, se describe en la figura número uno el proceso de aprovechamiento industrial de la caña de azúcar en los ingenios azucareros.

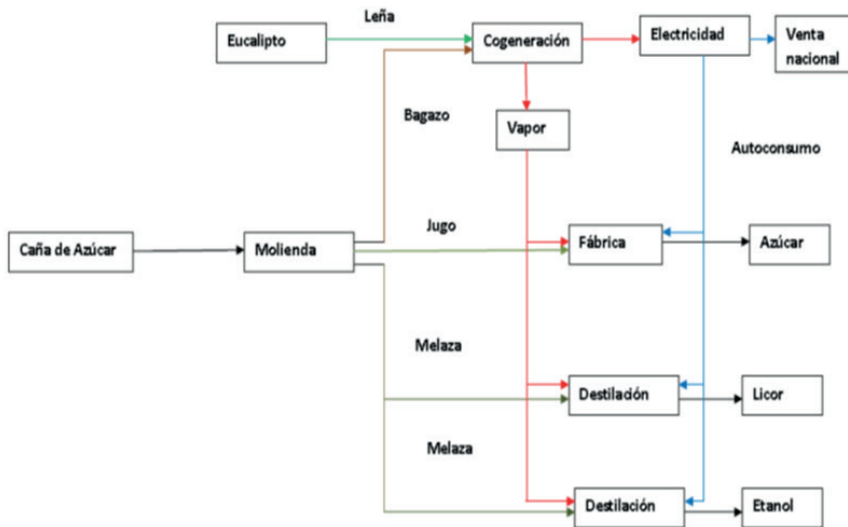


Figura 1. Flujo de producción de los ingenios azucareros de Nicaragua con sistemas de cogeneración y conectados al Sistema Interconectado Nacional.

En los ingenios azucareros la caña de azúcar se cultiva, se cosecha y luego se dirige a la molienda de donde se obtiene: bagazo como desecho, melaza y jugo de caña. Del jugo de la caña, se obtiene el azúcar destinado para el consumo nacional y a la exportación; de la melaza, se obtiene licor que también se comercializa a nivel nacional e internacional y el etanol que se destina a mercados internacionales exclusivamente.

Por su parte, el bagazo de caña se destina un proceso de cogeneración para la producción simultánea de vapor, utilizado en el proceso productivo de azúcar, melaza, jugo de caña, y en la generación de energía eléctrica. Fuera de zafra, se está comenzando a explorar la posibilidad de implementar el uso de cultivos energéticos, especialmente de la especie eucalipto, para generar el vapor del sistema de cogeneración antes mencionado.

3. Índices productivos del uso de caña de azúcar para la generación de energía eléctrica

El modelo de negocio de los ingenios es el empleo de la caña de azúcar para la producción de azúcar, melaza y partir del bagazo de caña energía eléctrica en la mayoría de los ingenios, excepto el Ingenio San Antonio, que adicionalmente produce ron y etanol. De manera que, el ciclo productivo de los ingenios inicia con el corte de la caña de azúcar extrayéndose 68.6 toneladas de caña por manzana (Mz) cultivada como promedio en los ingenios nicaragüenses (INE, 2019).

El cultivo de caña de azúcar representa un área de cultivo de alrededor de 101 000 manzanas sembradas con caña de azúcar, más de 800 productores privados de caña, 4 ingenios azucareros, 35, 283 empleos directos y más de 120 000 empleos indirectos generados. Se aproxima que existe una Inversión agrícola en la caña de azúcar superior a los US\$ 200 000 000 de dólares (Munguía y Ramos, 2015).

Adicionalmente, a partir de la caña molida se extraen 138.5 quintales de azúcar por manzana. Así mismo, se producen 70 231 toneladas métricas de melaza anualmente que es destinada a la industria de alimentos para el ganado. Sumado a lo anterior, el Ingenio San Antonio es el único que cuenta con una capacidad instalada de producción de 340 000 lts/día de etanol.

Además, los ingenios generan energía a partir del bagazo de la caña a través de la cogeneración que permite la producción de energía térmica para el proceso productivo y para la generación de vapor que luego es turbinado para la generación de energía eléctrica. Durante el periodo de zafra los ingenios generan en promedio de 0.9 MW-HR por tonelada de caña y como son agentes del mercado eléctrico nicaragüense venden esa energía a un precio promedio de 109 US\$/MW-HR (Despacho nacional de Carga, 2019). Fuera de Zafra el Ingenio San Antonio está utilizando estillas de Eucalipto para la generación de energía eléctrica con un consumo promedio anual de 24.49 toneladas métricas.

El costo variable de los ingenios es de 37.64 US\$/MW-HR (Munguía y Ramos, 2015) y que implica cuánto cuesta la generación de cada MW-HR empleando bagazo de caña. Por otra parte, por cada tonelada de caña molida, se extraen 0.35 toneladas de bagazo (Van den Brock y Van Wijk, 1998); por lo que los ingenios producen 24 ton de bagazo por manzana.

Considerando los costos de producción del uso del bagazo similares a los del uso de eucalipto para generar energía eléctrica sobre todo por poseer un poder calorífico similar se

tiene un costo actualizado de US\$ 13 por tonelada de eucalipto y un costo de US\$ 7 para el caso de la tonelada de bagazo (Tablas 1 y 2).

Tabla 1. Costo actualizado de Eucalipto. Obtenido en base a Van den Brock, R y Van Wijk, A. (1998).

Costo de Tonelada de Eucalipto		
	Año base 1997 \$/ton	Costo actualizado \$/ton
Establecimiento del cultivo \$/ton	0.28	0.4
Mantenimiento	0.27	0.4
Alquiler de tierra	0.71	1.1
Cosecha	0.11	0.2
Descarga	0.26	0.4
Transporte	0.4	0.6
Secado	0.11	0.2
Costo indirecto	0.2	0.3
Costo combustible	2.3	3.6
O&M	0.87	1.3
Inversión planta	0.78	1.2
Utilidades	2.3	3.6
Costo de ton	8.59	13

Tabla 2. Costo actualizado de Bagazo de caña. Obtenido en base a Van den Brock, R y Van Wijk, A. (1998).

Tonelada de Bagazo		
	Año base 1997 \$/ton	Costo actualizado \$/ton
Establecimiento del cultivo \$/ton		0.0
Mantenimiento		0.0
Alquiler de tierra		0.0
Cosecha		0.0
Descarga		0.0
Transporte		0.0
Secado	0.11	0.2
Costo indirecto	0.2	0.3
Costo combustible	1.3	2.0
O&M	0.83	1.3
Inversión planta	0.64	1.0
Utilidades	1.5	2.3
Costo de Bagazo ton	4.58	7

Los ingenios con sistemas de cogeneración poseen contratos de venta de energía donde se asigna un precio por la disponibilidad o pago de potencia disponible que se paga para amortizar la inversión y un costo de energía eléctrica que se actualiza anualmente en función del Índice de precios al productor de los Estados Unidos de Norteamérica. De forma que, el precio de la energía vendida por los ingenios es en realidad un costo variable que incluye costos de operación y mantenimiento e incluyen el costo del bagazo y el eucalipto.

4. Conclusión

En Nicaragua la biomasa sólida es empleada principalmente de forma no tradicional para cocción. No obstante, los ingenios azucareros están utilizando el bagazo de caña del proceso de producción de azúcar y madera de eucalipto para la cogeneración que les permite generar energía térmica para el proceso productivo y a la vez la generación de energía eléctrica para su autoconsumo industrial y el excedente lo venden al mercado eléctrico nacional.

5. Bibliografía

- CEPAL. (2008). La energía y las metas del milenio en Guatemala, Honduras y Nicaragua, Naciones Unidas.
- Cerdá, E. (2012). Energía obtenida a partir de biomasa. *Cuadernos económicos de ICE*, 83. <https://doi.org/10.32796/cice.2012.83.6036>
- Despacho nacional de Carga. (2019). Programación de sistema Interconectado Nacional. Obtenido desde: <http://www.cndc.org.ni>
- Instituto Nicaragüense de la Energía, INE. (2019). Estadísticas de Electricidad.
- Munguía P., Ramos, E. (2015). Estructura Productiva del Azúcar en Nicaragua, período 2009-2013. Trabajo de Seminario de Graduación para optar al título de licenciado en Economía, UNAN de León. Obtenido desde: <http://repositorio.unan.edu.ni/3951/>
- Multiconsult. (2006). Encuesta nacional de leña. Diagnóstico sobre oferta de consumos energéticos.
- Selva, G., Umaña, A. (1988). Administración de la Energía, editorial universitaria centroamericana, San José costa Rica 1988.
- Van den Brock, R y Van Wijk, A. (1998). Electricidad a partir de Eucalipto y Bagazo en Ingenios Azucareros de Nicaragua. Obtenido desde: <http://www.fao.org/3/x2351s/x2351s00.htm#TopOfPage>

Pirólisis de residuos del fruto de aguaje (*Mauritia Flexuosa* L.F) y aserrín maderas de baja densidad para La obtención de carbón

Alexa Stephany Guerrero Córdova¹,
Tania Elizabeth Guerrero Vejarano^{2*}

Laboratorio de Transformación Química en la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), Perú.

*Autor para correspondencia: tania.guerrero@unas.edu.pe

1. Introducción

En la actualidad la utilización de los subproductos forestales tiene un alto grado de desaprovechamiento; el rendimiento en el aserrío de la madera de las principales especies de bosques secundarios y primarios residuales varía entre 53.45% y 22.80% (AIDER, 2010). Asimismo, la pulpa del aguaje representa el 12 a 13% del peso seco del fruto (Del Castillo, 2015), por lo tanto, la diferencia es un deshecho que se convierte en una fuente de contaminación la misma que se ve reflejada en la quema o vertimiento al río Huallaga.

Entre las actividades económicas de la ciudad de Tingo María encontramos las cajonerías y la venta de aguaje, sin embargo, preocupa el rendimiento de la materia prima porque a partir de aquí proyectará el beneficio económico que obtendrá al aprovechar la madera rolliza de una determinada especie y el fruto de aguaje que posee escasa pulpa y mayor residuo. Una de las vías para utilizar los residuos es convertirlos en carbón vegetal. Al fabricar y comercializar este tipo de combustibles, se disminuiría considerablemente la cantidad de residuos, la contaminación ambiental, la tala de árboles para carbón convencional con bajo poder calorífico, se generaría nuevas fuentes de empleo, al mismo tiempo que se generaría una combustión más limpia y eficiente.

Bajo este contexto se plantea determinar ¿Cuál es la eficiencia del carbón elaborado a partir de aserrín y residuos de frutos de aguaje?, donde se planteó la siguiente hipótesis: el carbón obtenido con aserrín y residuos del fruto de aguaje tiene mayor poder calorífico por lo tanto es más eficiente y será una nueva alternativa de ingreso económico para la población interesada de la ciudad Tingo María.

Bajo este contexto se plantean los siguientes objetivos:

- Determinar el rendimiento del carbon vegetal obtenido del aserrin y desechos del fruto de aguaje.
- Determinar el poder calorifico de las briquetas del carbón obtenido del aserrin y desechos del fruto de aguaje.
- Determinar el tratamiento mas eficiente.

Soto y Nuñez (2008), elaboraron palletes a partir de aserrín de *Pinus radiata* (D. Don) y carbonilla de carbón vegetal, con similares características en peso, volumen y densidad, manteniendo como única variable la cantidad de aserrín y carbonilla en cada briqueta. Según los resultados, es posible fabricar briquetas de carbonilla utilizando aserrín de *Pinus radiata* (D. Don) como material aglomerante, combinando el 50 % de ambas materias primas, la combinación es óptima en cuanto a ganancia energética; sin embargo, afirma que con un 47.5 % de carbonilla se obtienen briquetas más resistentes y con ganancia energética de 24.25% con respecto a una briqueta 100% aserrín.

Blesa (2002), Realizó un estudio de preparación de briquetas combustibles sin humos a partir de carbones de bajo rango y biomasa (aserrín, paja, huesos de oliva y cascara de almendra), pirolizando estos materiales con objeto de reducir los volátiles y el contenido de azufre del carbón de partida, la pirólisis se realizó a 500, 550, 600, 650 y 700 °C de temperatura, usando aditivos de calcio, hidróxido de calcio y caliza para mejorar las propiedades de combustión de las briquetas y especialmente la retención de azufre y ligantes, humatos, melazas y almidón para facilitar la unión de partículas a aglomerar. El estudio indica que las briquetas más adecuadas son las que utilizan aditivos de calcio y melazas como ligantes.

Valderrama *et al.* (2008). Elaboraron tres tipos de briquetas cilíndricas con un volumen de 446 cm³ con agujeros de 7.9 mm para facilitar el secado y combustión, teniendo como materia prima residuos sólidos orgánicos secados al aire libre (RSO), estiércol de cuy, aserrín, arcilla y cal, según sus resultados el poder calorífico inferior de las briquetas Tipo 1 (RSO, estiércol de cuy y aserrín) fue de 13826 kJ/kg, del Tipo 2 (RSO, estiércol de cuy, aserrín y cal) fue de 13029 kJ/kg y del Tipo 3 (RSO, estiércol de cuy y arcilla) 10725 kJ/kg. Afirman que esta variación se debe a que la cal y la arcilla logran disminuir el poder calorífico de las briquetas y lo hacen gradualmente de acuerdo al porcentaje en peso en su composición; el punto de inflamación de las briquetas fluctúa entre (86-90) °C. Por las briquetas tipo 1, tipo 2 y tipo 3, originan (8, 13 y 20) % de cenizas, debido a que poseen 0% arcilla o cal, 5% de cal y 10% de arcilla respectivamente.

El poder calorífico de la leña varía entre 2500 y 3500 kcal/kg, dependiendo del origen. Se presenta en trozos de un metro de largo, generalmente con un diámetro promedio alrededor de 14 cm. Su uso es principalmente calderas, en pequeñas y medianas empresas, pero su consumo mayor es para usos domésticos. Asimismo, menciona que el consumo de carbón en Chile, es de aproximadamente 19.2%, para el sector residencial, el poder calorífico de este combustible fluctúa entre los 5500 a 6500 kcal/kg, dependiendo del tipo de carbón. El carbón es usado en diversos tipos de calderas industriales (Amigo y Villarroel, 2011).

De acuerdo a Fredes (2014), indican que el poder calorífico de briquetas comercializadas de uso común en Chile, varían de 4 a 4.5 cal (poder calorífico inferior) y de 4.5 a 5 cal

(poder calorífico superior). De mismo modo, la norma ENPlus, indican que las briquetas comercializadas deben de tener un poder calorífico mayor o igual a 4.25 cal.

Fonseca y Tierra (2011), realizaron pruebas de producción de briquetas, con diferentes tipos y porcentajes de aglutinantes, los mejores resultados se obtienen para una composición de 10% de cola blanca con 90% de aserrín, y 4% de almidón de yuca con 96% de cascarilla. Estas briquetas se someten a diferentes pruebas, entre las que se destacan la resistencia al aplastamiento (1910.34 N las de aserrín, y 1933.87 N las de cascarilla), poder calorífico superior (28.41 MJ/kg las de aserrín, y 16.92 MJ/kg las de cascarilla).

NTC-2060, citado por Fonseca y Tierra (2011), menciona que el poder calorífico que debe tener una briqueta combustible, es como mínimo 12.5 MJ/kg. Al igual que otros autores establecen que el rango de poder calorífico considerado para que la briqueta sea un buen combustible varía aproximadamente de 13.8 a 17.5 MJ/kg. Estos efectos se reflejan sobre el rendimiento en carbón vegetal obtenido a partir de un determinado peso de madera. A bajas temperaturas (300°C) es posible un rendimiento en carbón de casi el 50%, Con temperaturas de carbonización de 500-600°C los volátiles son escasos y son típicos los rendimientos del 30% en la carbonera. Con temperaturas muy altas (alrededor de 1000°C) el contenido volátil es casi cero y el rendimiento cae a alrededor del 2% (FAO, 1983).

Hernandez (2011) indica que, en un proceso de carbonización existen varios factores que determinan su rendimiento, como el uso de materia prima de baja densidad, dado que el proceso de carbonización implica una pérdida de masa, las mayores pérdidas ocurren en el rango de 400°C a 600°C, otro factor es la humedad de la materia, puesto que se requiere grandes insumos de energía calorífica, esto forma gran parte del éxito del proceso. La descomposición por pirolisis o termal de la biomasa no se inicia antes que llegue a una temperatura de alrededor de 300 °C. El mismo indica que el rendimiento teórico es de: 42% en temperaturas de 300 °C, 37% en 400 °C, 33% en 500 °C, 31% en 600 °C y 30% en 700 °C. FAO (1983), Indica que el rendimiento de la quema del carbón vegetal se influye por el método de carbonización; es así que, en 1000 kg de madera con 25% de humedad, se tiene un rendimiento de 13% en parvas de tierra (horno), 17% en hornos forestales y 24.5% en hornos industriales.

Blesa (2002), pirolizó distintos tipos de biomasa: aserrín, semillas de oliva y cascara de almendra, a 400 y 600 °C. Obteniéndose un poder calorífico de 29.2 y 30.4 MJ/kg para aserrín a 400 y 600 °C respectivamente, 31.2 y 32 MJ/kg para semillas de oliva en 400 y 600 °C, y 31.1 y 34.2 MJ/kg para cascara de almendra en 400 y 600 °C respectivamente. Además, obtuvo el rendimiento de masa en la pirolisis de carbón, aserrín y semillas de Oliva a 600 °C a distintos tiempos: 500, 1000 y 1500 segundos. Obteniéndose rendimientos de masa en carbón de: 88%, 80% y 65% en 500, 1000 y 1500 segundos respectivamente, en aserrín se obtuvo rendimientos de 93%, 85% y 24% en 500, 1000 y 1500 segundos, y en semillas de oliva se obtuvo rendimientos de 96%, 85% y 35% en 500, 1000 y 1500 segundos.

2. Materiales y Métodos

2.1. Lugar de ejecución

La investigación se ejecutó en el Laboratorio de Transformación Química en la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la

Selva (UNAS), distrito Rupa Rupa, provincia Leoncio Prado, departamento Huánuco. Y el Laboratorio de Propiedades Físico Químicas de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Nacional de Ucayali (UNU), distrito de Callería, provincia de Coronel Portillo, departamento de Ucayali.

De acuerdo a la clasificación de zonas de vida o formaciones vegetales del mundo y el diagrama bioclimático de Leslie R. Holdridge, la zona de Tingo María está ubicada, en la formación vegetal de bosque muy húmedo Premontano Tropical (bmh-PT). La ciudad de Pucallpa está ubicada en la zona de vida Bosque húmedo premontano tropical (bh-PT).

Las condiciones climáticas del área de estudio, según datos de la estación meteorológica José Abelardo Quiñones de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, la zona de estudio presenta una temperatura máxima media anual de 29.7 °C, una mínima media anual de 20.4 °C, siendo la media anual de 25 °C. La precipitación promedio anual es de 3300 mm; El clima de la ciudad de Pucallpa son de: temperatura media mensual es de 27.0 °C (año 2001) con extremos de 20.1 °C y 36 °C. La humedad relativa media anual es de 83.5%, disminuyendo ligeramente en los meses. El promedio de precipitación es de 1535 a 2100 mm/año.

2.2. Equipos y materiales

Se utilizó residuos de aserrín y de fruto de aguaje, balanza analítica, estufa, Equipo para producir carbón por pirólisis, equipo calorimétrico, insumos aditivos.

2.3. Preparación de los residuos

Se recolectó los residuos de aserrín de las cajonerías y los residuos del fruto de aguaje (cascarilla y semilla) proporcionados por las vendedoras de la bebida "aguajina" de la ciudad de Tingo María, posteriormente los residuos fueron secados a temperatura ambiente no sin antes tamizar con malla 40x60.

2.4. Carbonización de los residuos

El proceso de carbonización se llevó a cabo por el método de pirólisis lenta a dos temperaturas, tres tiempos de carbonización y con los porcentajes de mezclas (aserrín: aguaje) especificadas en los factores a evaluar. Se realizó en un equipo de pirólisis regulado a 300 y 400 °C por un tiempo de 15 min; 20 min; 25 min cada tratamiento. Los líquidos producto de la carbonización fueron recolectados en probetas de 100 mL; al finalizar cada tratamiento se enfrió al carbón obtenido con agua fría, finalmente se procedió a extraer al carbón manualmente almacenándolo en bolsas plásticas, previamente codificadas.

2.5. Determinación del rendimiento del carbón obtenido

El rendimiento del carbón se determinó para cada tratamiento y repetición, reemplazando los datos de los pesos secos de los residuos y del carbón obtenido, aplicado en la siguiente fórmula:

$$\text{Rendimiento} = \left(\frac{\text{Peso seco del carbón}}{\text{Peso seco de los residuos de aserrín y aguaje}} \right) \times 100$$

2.6. Elaboración de las briquetas de carbón

Las briquetas fueron elaboradas con una prensa hidráulica con barómetro de 300 MPa. Se emplearon moldes de 10 cm de alto por una pulgada de diámetro.

2.7. Determinación del poder calorífico de las briquetas

Se determinó con un equipo Calorímetro comercial, que cuenta con un alimentador de oxígeno y un regulador de presión. La unidad de medida obtenida en cada muestra, es calorías por gramo. Se pesó una muestra, 0.50 mg de cada tratamiento y se depositó en un crisol de acero inoxidable el cual va al interior del equipo calorimétrico, el equipo determinó el poder calorífico de cada tratamiento en 8 minutos

2.8. Determinación de la eficiencia del carbón obtenido

Se realizó una gráfica en función al rendimiento del carbón y poder calorífico de las briquetas obtenidas producto de los tratamientos en estudio, determinando cual es la briqueta es más eficiente

2.9. Diseño de investigación

En la presente investigación se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo de tres factores (3A, 3B, 2C). Teniendo un total de 18 tratamientos y 3 repeticiones para cada uno, contando con 54 unidades experimentales. Como factores se tuvo: mezcla de residuos (Factor A: a1: 40% de aserrín y 60% de aguaje, a2: 50% de aserrín y 50% de aguaje y a3: 60% de aserrín y 40% de aguaje), tiempo de carbonización (Factor B: b1: 15 minutos, b2: 20 minutos y b3: 25 minutos) y temperatura de carbonización (Factor C: c1: 300°C y c2: 400°C)

Tabla 1. Descripción de los tratamientos en estudio.

	Mezcla (Factor A)		Tiempo de carbonización (Factor B)					
			b1 (15 min)		b2 (20 min)		b3 (25 min)	
	Aserrín	Aguaje	Temperatura de carbonización (Factor C)					
			c1 (300°C)	c2 (400°C)	c1 (300°C)	c2 (400°C)	c1 (300°C)	c2 (400°C)
a1	40 %	60 %	T1	T2	T3	T4	T5	T6
a2	50 %	50 %	T7	T8	T9	T10	T11	T12
a3	60 %	40 %	T13	T14	T15	T16	T17	T18

3. Rendimiento del carbón vegetal

En el Tabla 2 observamos que la mejor respuesta sobre el rendimiento del carbón vegetal se obtiene del tratamiento T₁₃ con los factores Mezcla 60% aserrín: 40% aguaje, tiempo 15' y temperatura 300°C obteniendo 50.87%, seguido por los tratamientos T₇ con los factores Mezcla 50% aserrín: 50% aguaje, tiempo 15' y temperatura 300°C obteniendo 48.10%, T₁₅ con los factores Mezcla 60% aserrín: 40% aguaje, tiempo 15' y temperatura 300°C obteniendo 47.67%, T₁ con los factores Mezcla 40% aserrín: 60% aguaje, tiempo 15' y temperatura 300°C con 47.03 que estadísticamente no muestran diferencia significativa

entre ellos; el tratamiento T₃ con los factores Mezcla 40% aserrín: 60% aguaje, tiempo 20', temperatura 300°C muestra un rendimiento de 46.3 %, observamos también a los T₁₁ con los factores Mezcla 50% aserrín: 50% aguaje, tiempo 25', temperatura 300°C y el T₁₇ con los factores Mezcla 60% aserrín: 40% aguaje, tiempo 25', temperatura 300°C no muestran diferencia estadística significativa entre sí obteniendo 45.6% y 45.28% respectivamente; el tratamiento T₈ con los factores Mezcla 50% aserrín: 50% aguaje, tiempo 15' y temperatura 400°C muestra disminución del rendimiento con el 45.2%; asimismo, el T₅ Mezcla 40% aserrín: 60% aguaje, tiempo 25' y temperatura 300°C 43.7%, T₁₀ con los factores Mezcla 50% aserrín: 50% aguaje, tiempo 20' y temperatura 400°C con 42.8%; los tratamientos T₂, T₁₄, T₁₆, T₄ y T₁₂ no son significativamente diferentes entre sí obteniendo 41.1%, 39.8%, 39.1%, 38.3% y 38.1%. Finalmente, los tratamientos con menor rendimiento son T₁₈ factores Mezcla 60% aserrín: 40% aguaje, tiempo 25', temperatura 400°C y el T₆ con Mezcla 40% aserrín: 60% aguaje, tiempo 25', temperatura 400°C no muestran diferencia estadística significativa entre sí obteniendo un rendimiento de 36.1% y 35.7% respectivamente.

Tabla 2. Prueba Tukey para el efecto de interacción triple del factor mezcla, tiempo y temperatura sobre el rendimiento del carbón vegetal.

Trat.	Aserrín: aguaje (%)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Rendimiento (%)	Significancia
T ₁₃	60:40	15	300	50.87	a
T ₇	50:50	15	300	48.1	b
T ₁₅	60:40	20	300	47.67	b c
T ₉	50:50	20	300	47.6	b c
T ₁	40:60	15	300	47.03	b c d
T ₃	40:60	20	300	46.3	c d e
T ₁₁	50:50	25	300	45.57	d e
T ₁₇	60:40	25	300	45.28	d e f
T ₈	50:50	15	400	45.22	e f
T ₅	40:60	25	300	43.7	f g
T ₁₀	50:50	20	400	42.75	g h
T ₂	40:60	15	400	41.08	h i
T ₁₄	60:40	15	400	39.83	i j
T ₁₆	60:40	20	400	39.08	j
T ₄	40:60	20	400	38.3	j
T ₁₂	50:50	25	400	38.13	j
T ₁₈	60:40	25	400	36.1	k
T ₆	40:60	25	400	35.72	k

Letras distintas presentan significancia para $p=0.05$.

4. Determinación del poder calorífico de las briquetas de carbón

En el Tabla 3 observamos que la mejor respuesta sobre el poder calorífico del carbón vegetal es el T₁₈ 60% aserrín: 40% aguaje, tiempo 25' y temperatura 400°C obteniendo

6.48 kcal/g, seguido por el T₁₆ 60% aserrín: 40% aguaje, tiempo 20' y temperatura 400 °C obteniendo 6.23 kcal/g, observamos también al T₆ 40% aserrín: 60% aguaje, tiempo 25' y temperatura 400 °C obteniendo 6.03 kcal/g y al T₁₄ 60% aserrín: 40% aguaje, tiempo 15' y temperatura 400 °C obteniendo 5.88 kcal/g, observamos también que los tratamientos T₁₂ 50% aserrín: 50% aguaje, tiempo 25', temperatura 400 °C y T₄ 40% aserrín: 60% aguaje, tiempo 20', temperatura 400 °C no muestran diferencia estadística significativa entre sí obteniendo 5.83 y 5.82 kcal/g respectivamente, asimismo, los tratamientos T₂ 40% aserrín: 60% aguaje, tiempo 15' y temperatura 400 °C, T₁₇ 60% aserrín: 40% aguaje, tiempo 25' y temperatura 300 °C y T₁₀ 50% aserrín: 50% aguaje, tiempo 20' y temperatura 400 °C no son significativamente diferentes entre sí, el T₈ 50% aserrín: 50% aguaje, tiempo 15' y temperatura 400 °C genera 5.67 kcal/g, el T₅ 40% aserrín: 60% aguaje, tiempo 25' y temperatura 300 °C genera 5.61 kcal/g, el T₁₁ aserrín 50%: 50% aguaje, tiempo 25' y temperatura 300 °C genera 5.51 kcal/g, el T₉ aserrín 50%: 50% aguaje, tiempo 20' y temperatura 300 °C genera 5.46 cal/kg y se encuentra en el mismo nivel de significancia con el T₁₅ aserrín 60%: 40% aguaje, tiempo 20' y temperatura 300 °C genera 5.43 kcal/g, el T₃ aserrín 40%: 60% aguaje, tiempo 20' y temperatura 300 °C genera 5.39 kcal/g, finalmente observamos a los tratamientos con menor poder calorífico T₁₃ con 5.13 kcal/g se encuentra en el mismo nivel de significancia con el T₁ 5.13 kcal/g, por último el T₇ con el menor poder calorífico 4.99 kcal/g.

Tabla 3. Prueba Tukey para el efecto de interacción triple del factor mezcla, tiempo y temperatura sobre el poder calorífico del carbón vegetal. (Letras distintas presentan significancia para $p=0.05$).

Trat.	Aserrín:aguaje (%)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Poder calorífico (kcal/g)	Prueba Tukey
T ₁₈	60:40	25	400	6.48	a
T ₁₆	60:40	20	400	6.23	b
T ₆	40:60	25	400	6.03	c
T ₁₄	60:40	15	400	5.88	d
T ₁₂	50:50	25	400	5.83	e
T ₄	40:60	20	400	5.82	e
T ₂	40:60	15	400	5.76	f
T ₁₇	60:40	25	300	5.71	f g
T ₁₀	50:50	20	400	5.71	f g
T ₈	50:50	15	400	5.67	g
T ₅	40:60	25	300	5.61	h
T ₁₁	50:50	25	300	5.51	i
T ₉	50:50	20	300	5.46	j
T ₁₅	60:40	20	300	5.43	j k
T ₃	40:60	20	300	5.39	k
T ₁₃	60:40	15	300	5.17	l
T ₁	40:60	15	300	5.13	l
T ₇	50:50	15	300	4.99	m

5. Determinación de la eficiencia de las briquetas

El Tabla 4 muestra los promedios del rendimiento del carbón y del poder calorífico de las briquetas de los 18 tratamientos en estudio, permitiendo hacer un análisis de los tratamientos más eficientes.

Tabla 4. Poder calorífico y rendimiento del carbón vegetal según los tratamientos en estudio.

Trat.	Rendimiento (%)	Poder calorífico (kcal/g)
T ₁₈	36.10	6.48
T ₁₆	39.08	6.23
T ₆	35.72	6.03
T ₁₄	39.83	5.88
T ₁₂	38.13	5.83
T ₄	38.30	5.82
T ₂	41.08	5.76
T ₁₇	45.28	5.71
T ₁₀	42.75	5.71
T ₈	45.22	5.67
T ₅	43.70	5.61
T ₁₁	45.57	5.51
T ₉	47.60	5.46
T ₁₅	47.67	5.43
T ₃	46.30	5.39
T ₁₃	50.87	5.17
T ₁	47.03	5.13
T ₇	48.10	4.99

La Figura 1 permite analizar la eficiencia energética de las briquetas de carbón en cuanto a las características de poder calorífico y rendimiento.

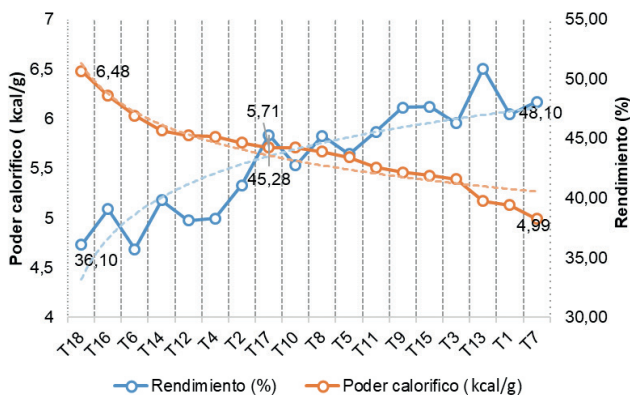


Figura 1. Análisis de la relación óptima entre el poder calorífico de las briquetas y el rendimiento del carbón.

El T_{18} (60% aserrín: 40% aguaje, 25', 400°C) genera el máximo poder calorífico 6.48 kcal/g y el mínimo de rendimiento 36.1%, el T_7 (50% aserrín: 50% aguaje, 15', 300°C) genera el menor poder calorífico 4.99 kcal/g y el máximo rendimiento 48.10%, siendo el tratamiento más eficiente el T_{17} 60 aserrín %: 40% aguaje, tiempo 25' y temperatura 300°C generando 5.71 kcal/g y 45.28 % de rendimiento.

6. Discusión

6.1. Rendimiento del carbón vegetal

La mejor respuesta al rendimiento del carbón se obtiene al emplear mayor porcentaje de aserrín en la mezcla, empleando el mínimo tiempo y menor temperatura de carbonización, siendo el T_{13} : 60% aserrín: 40% aguaje, tiempo 15' y temperatura 300°C el de mayor rendimiento 50.87%, por el contrario, al emplear el menor porcentaje de aserrín, el máximo tiempo y temperatura de carbonización el rendimiento disminuye significativamente, observamos al T_6 Mezcla 40% aserrín: 60% aguaje, tiempo 25', temperatura 400°C genera el menor rendimiento 35.7%. Haciendo un análisis de los rendimientos promedio observamos a los tratamientos T_{17} y T_8 quienes se encuentran en el mismo nivel de significancia aun cuando cada uno presenta factores diferentes: T_{17} (60% aserrín: 40% aguaje, tiempo 25', temperatura 300°C) y T_8 (50% aserrín: 50% aguaje, tiempo 15', temperatura 400°C) observamos que no son significativamente diferentes entre sí generando 45.28 y 45.22% de rendimiento respectivamente. Asimismo, nuestros resultados coinciden con la investigación de Duke *et al.* (2011) quienes afirman que, con pirolisis lenta, tiempo de residencia de vapor >30 min a bajas temperaturas (300°C) es posible un rendimiento en carbón de casi el 50%, con temperaturas de carbonización de 500-600°C los volátiles son escasos y son típicos los rendimientos del 30% en la carbonera. Con temperaturas muy altas (alrededor de 1000°C) el contenido volátil es casi cero y el rendimiento cae a alrededor del 2%. Por otro lado, FAO (1983), Indica que el rendimiento de la quema del carbón vegetal se influye por el método de carbonización; es así que, en 1000 kg de madera con 25% de humedad, se tiene un rendimiento de 13% en parvas de tierra (horno), 17% en hornos forestales y 24.5% en hornos industriales. El equipo de pirolisis utilizado en la presente investigación, al ser un diseño industrial obtiene altos rendimientos (50.87% - 35.72%) frente a otros métodos de pirolisis de carbón.

En cuanto a las interacciones dobles tiempo- temperatura se encontró mayores rendimientos en los niveles de menor tiempo y menor temperatura, siendo 15 min, 20 min y 25 min a 300°C, donde se obtuvo rendimientos de 48.67%, 47.19% y 44.85%, asimismo, la interacción mezcla-temperatura refleja los mayores rendimientos al emplear mayor porcentaje de aserrín y menor temperatura de carbonización, notamos que 60% aserrín: 40% aguaje a 300°C genera 47.94% de rendimiento. Blesa (2002) obtuvo el rendimiento de masa en la pirolisis de carbón, aserrín y semillas de Oliva a 600°C a distintos tiempos: 500, 1000 y 1500 segundos (8.3, 16.6 y 25 min). Obteniéndose rendimientos de masa en carbón de: 88%, 80% y 65% en 500, 1000 y 1500 segundos respectivamente, en aserrín se obtuvo rendimientos de 93%, 85% y 24 % en 500, 1000 y 1500 segundos, y en semillas de oliva se obtuvo rendimientos de 96%, 85% y 35% en 500, 1000 y 1500 segundos, los resultados de Blesa

reflejan diferencias en cuanto al rendimiento al interactuar los factores mezcla- tiempo lo cual difiere de los resultados de la presente investigación donde no se encontraron diferencias estadísticas en dicha interacción.

Analizando la interacción simple sobre el tipo de mezcla se determina que al emplear (a2) 50% aserrín y 50% aguaje se obtiene 44.56 % de rendimiento; el porcentaje disminuye al emplear la mezcla (a3) 60% aserrín y 40% aguaje 43.14%, finalmente con la mezcla (a1) 40% aserrín:60% aguaje se obtiene el menor porcentaje de rendimiento 42.02%, es posible que estos resultados tengan un rango de error debido a que, aun cuando se hizo el máximo esfuerzo por extraer el 100% del carbón, el diseño del equipo utilizado no permitió lograrlo, al extraer la materia carbonizada algunos restos quedaban pegados, por lo que es posible que el rendimiento sea mayor. Hernandez (2011) indica que, en un proceso de carbonización existen varios factores que determinan su rendimiento, como el uso de materia prima de baja densidad, dado que el proceso de carbonización implica una pérdida de masa, las mayores pérdidas ocurren en el rango de 400 °C a 600 °C. Otro factor es la humedad de la materia, puesto que se requiere grandes insumos de energía calorífica, esto forma gran parte del éxito del proceso. La descomposición por pirolisis o termal de la biomasa no se inicia antes que llegue a una temperatura de alrededor de 300 °C. El mismo indica que el rendimiento teórico es de: 42% en temperaturas de 300°, 37% en 400 °C, 33% en 500 °C, 31% en 600 °C y 30% en 700 °C. De igual forma, Duke *et al.* (2011), citado por LOHRI *et al.* (2015), indica 4 tipos de pirolisis: pirolisis lenta, pirolisis intermedia, pirolisis rápida y gasificación, en el cual se obtiene mayor rendimiento con menor temperatura (Pirolisis lenta). Estos resultados coinciden con los de la presente investigación debido a que efectivamente se obtuvo un mayor rendimiento con el menor nivel de temperatura (300 °C), y el menor tiempo de carbonización (15 minutos).

6.2. Poder calorífico del carbón vegetal

La mejor respuesta sobre el poder calorífico del carbón vegetal está dado por el T₁₈ con los factores Mezcla 60% aserrín: 40% aguaje (a3), tiempo 25'(b3) y temperatura 400 °C (c2) obteniendo 6.48 kcal/g; pero, si se desea optimizar el tiempo de carbonización el tratamiento T₁₆ con los factores Mezcla 60% aserrín: 40% aguaje (a3), tiempo 20'(b2) y temperatura 400 °C (c2) genera 6.23 kcal/g, resultado que no se aleja del tratamiento ganador, observamos también al T₆ con los factores Mezcla 40% aserrín: 60% aguaje (a1), tiempo 25' (b3) y temperatura 400 °C (c2) si se desea emplear como materia prima mayor cantidad de residuos de aguaje este tratamiento genera 6.03 kcal/g. Villachica (1996) estudió las características del fruto de aguaje encontrando que sólo del 12 al 13% del peso seco del fruto es pulpa, lo que quiere decir que entre el 88 al 87% del fruto es residuo por lo que un cuando el aserrín es un residuo con mejores características energéticas, 6.03 kcal/g del T₆ serían una buena alternativa para dar un valor agregado a los residuos del fruto de aguaje en la Amazonía.

Diversos autores han estudiado el poder calorífico de las briquetas Valderrama *et al.* (2008) elaboraron briquetas Tipo 1 (RSO, estiércol de cuy y aserrín) donde el poder calorífico de las mejores briquetas fue de 13826 kJ/kg (3.30 kcal/g). Estos resultados coinciden con los de la presente investigación en cuanto al factor mezcla debido a que el poder calorífico aumentó al emplear aserrín 60%: 40% aguaje generando en el análisis de factores

simples 5.82 kcal/g, el motivo por el que el poder calorífico de las briquetas del estudio de Valderrama es inferior sería porque no incluyó el proceso de pirólisis.

Fredes (2014) indica que el poder calorífico superior de briquetas comercializadas de uso común en Chile varía de 4.5 a 5 kcal/g y de poder calorífico inferior de 4 a 4.5 kcal/g. Asimismo, la norma ENPlus, indica que las briquetas comercializadas deben tener un poder calorífico mayor o igual a 4.25 kcal/g. En la presente investigación todos los poderes caloríficos resultaron superiores a 5.43 kcal/g cumpliendo ampliamente el rango mínimo para briquetas a comercializar.

Amigo y Villarroel (2011) menciona que el poder calorífico del carbón fluctúa entre los 5.5 a 6.5 kcal/g, dependiendo del tipo de carbón. Según los resultados luego del proceso de pirólisis observamos que el carbón producido en la presente investigación alcanzó poderes caloríficos entre 5.42 kcal/g – 6.48 kcal/g los cuales son muy aceptables. Vera (2012), pirolizó briquetas conformados por: cascarilla de café, bagazo de caña, aserrín y aglomerante natural generando 8.39 kcal/g, el poder calorífico es superior al de nuestra investigación aun cuando los residuos no fueron sometidos al proceso de pirólisis, Blesa (2002), pirolizó distintos tipos de biomasa: aserrín, semillas de oliva y cascara de almendra obteniendo un poder calorífico de 29.2 y 30.4 MJ/kg (6.97 y 7.26 kcal/g) para aserrín a 400 y 600 °C respectivamente, 31.2 y 32 MJ/kg (7.45 y 7.64 kcal/g) para semillas de oliva en 400 y 600 °C, y 31.1 y 34.2 MJ/kg (7.43 y 8.17 kcal/g) para cascara de almendra en 400 y 600 °C respectivamente. La razón por la que difieren nuestros resultados con los de Blesa sería porque los residuos empleados como mezcla poseen características energéticas superiores al aserrín y aguaje; respecto al factor temperatura el tratamiento ganador en cuanto a poder calorífico fue el del T₁₈ con los factores Temperatura 400 °C (c2), Mezcla 60% aserrín: 40% aguaje (a3) y Tiempo 25'(b3) obteniendo 6.48 kcal/g.

Analizando por separado cada factor empleado en la presente investigación respaldamos al tratamiento ganador observando que, en el análisis estadístico efectivamente la mezcla con mayor porcentaje de aserrín 60%: 40% aguaje genera el mayor poder calorífico 5.82 kcal/g, disminuye al emplear menos aserrín 40%: 60% aguaje con 5.62 kcal/g y permite determinar que no es recomendable emplear la mezcla aserrín 50%:50% aguaje debido a que disminuye a 5.53 kcal/g; del último resultado, deducimos se debería a que cada residuo (aserrín: aguaje) poseen características físicas y químicas diferentes que al descomponerse térmicamente en las mismas proporciones desaceleran el proceso de carbonización dando como resultado un poder calorífico significativamente bajo respecto a las mezclas 40%:60% y 60%:40%.

Haciendo un análisis de los resultados podemos decir que si se desea optimizar el tiempo de carbonización el tratamiento T₁₆ con los factores Mezcla 60% aserrín: 40% aguaje (a3), tiempo 20'(b2) y temperatura 400 °C (c2) genera 6.23 kcal/g, resultado que no se aleja del tratamiento ganador, observamos también al T₆ con los factores Mezcla 40% aserrín: 60% aguaje (a1), tiempo 25'(b3) y temperatura 400 °C (c2) si se desea emplear como materia prima mayor cantidad de residuos de aguaje este tratamiento genera 6.03 kcal/g por último si lo que se quiere es emplear menos temperatura de carbonización el tratamiento promedio T₁₇ aserrín 60%:40%aguaje, tiempo 25' y temperatura 300 °C genera 5.71 kcal/g que es un poder calorífico aceptable según las investigaciones citadas.

Rodriguez (2010) indica que la lignina se descompone a temperaturas aproximadas de 310-400°C. Por encima de 400°C, la biomasa es totalmente convertida en carbón produciendo compuestos más densos y con mayor poder calorífico. Observando individualmente los resultados del factor temperatura de carbonización podemos decir que al emplear temperatura de carbonización de 400°C (c2) se generan más calorías 5.93 kcal/g resultado que según la NTC-2060 es bueno, al carbonizar a 300°C (c1) el poder calorífico disminuye a 5.38 kcal/g por lo que no es recomendable; las interacciones dobles respaldan los resultados, notamos que al interactuar los factores mezcla/temperatura aserrín 60%:40% aguaje con temperatura (c2) 400°C se generan 6.20 kcal/g y al interactuar los factores tiempo/temperatura Tiempo 25' (b3) con temperatura 400°C (c2) 6.11 kcal/g. Por lo tanto, el poder calorífico del carbón específicamente depende del tipo de mezcla que se emplea del tiempo y temperatura en que se carboniza la mezcla.

Fonseca y Tierra (2011) sobre "Requisitos de las briquetas", menciona que el poder calorífico que debe tener una briqueta combustible, es como mínimo de 12.5 MJ/kg (2.98 kcal/g), otros autores establecen que el rango de poder calorífico considerado para que la briqueta sea de buena calidad varía aproximadamente de 13.8 a 17.5 MJ/kg (3.30 a 4.18 kcal/g). Por lo tanto, podemos decir que las briquetas elaboradas cumplen con las características energéticas requeridas para ser consideradas de buena calidad.

Soto y Nuñez (2008), elaboraron briquetas a partir de aserrín de *Pinus radiata* (D. Don) y carbonilla de carbón vegetal, con similares características en peso, volumen y densidad, manteniendo como única variable la cantidad de aserrín y carbonilla en cada briqueta. Según los resultados, es posible fabricar briquetas de carbonilla utilizando aserrín de *Pinus radiata* (D. Don) como material aglomerante, combinando el 50% de ambas materias primas, la combinación es óptima en cuanto a ganancia energética; sin embargo, afirma que con un 47.5% de carbonilla se obtienen briquetas más resistentes y con ganancia energética de 24.25% con respecto a una briqueta 100% aserrín.

6.3. Eficiencia del carbón vegetal

De los resultados observamos que el rendimiento y el poder calorífico se encuentran en una relación inversamente proporcional, tratamientos con mayores rendimientos presentan los más bajo poderes caloríficos, sin embargo, haciendo un análisis del punto óptimo observamos que el tratamiento más eficiente según sus características de poder calorífico y rendimiento es el T₁₇ 60 aserrín: 40%aguaje, tiempo 25' y temperatura 300°C generando 5.71 kcal/g y 45.28% de rendimiento. Resultados similares obtuvo Blesa (2002) a 600°C durante 25 minutos obtuvo 24% de rendimiento y 7.26 kcal/g y 35% de rendimiento en aserrín; en semillas de oliva 35% y 8.16 kcal/g.

7. Conclusiones

Culminada la investigación, se arribaron a las siguientes conclusiones:

1. El rendimiento del carbón vegetal es mayor al carbonizar T₁₃ mezcla 60% aserrín: 40% aguaje con un tiempo de carbonización de 15 minutos y temperatura de 300°C, alcanzando 50.87% de rendimiento.

2. El poder calorífico del carbón es mayor al carbonizar T₁₈ mezcla 60% aserrín: 40% aguaje, tiempo de carbonización 25 minutos y temperatura 400 °C, generando 6.48 kcal/g.
3. Las briquetas de carbón más eficientes según sus características de rendimiento y poder calorífico se obtuvieron con el tratamiento T₁₇ 60% aserrín: 40% aguaje, tiempo 25 minutos y temperatura 300 °C generando 5.71 kcal/g y 45.28% de rendimiento.

Referencias

- AIDER. (2010). *Diversificación de productos y estudios de prototipos de valor agregado*. Asociación para la Investigación y Desarrollo Integral (AIDER). Lima, Perú. 65 p.
- Amigo, P., Villarroel, G. (2011). *Estudio de Prefactibilidad para la Implementación de una Planta Briquetadora en el Aserradero de la Empresa Punta Arenas*. Trabajo de Titulación Presentado en Conformidad a los Requisitos para Obtener el Título de Ingeniero en Mecánica Industrial. Universidad de Magallanes. Chile. 91 p.
- Biocomercio. (2006). *Sistemas de reportes de biocomercio y Plan de Negocios de Amazon Ivory E.I.R.L.*
- Blesa, J. (2002). *Briquetado de Lignitos con Aditivos. Seguimiento Físico-Químico del Proceso*. Tesis Doctoral. Instituto de Carboquímica. Zaragoza, España. 284 p.
- Del Castillo, D. (2015). *La maravillosa palmera de la Amazonía*. Instituto De Investigación de la Amazonía Peruana.
- FAO. (1983). *Métodos simples para fabricar carbón vegetal*. Estudio FAO: Montes 41. Roma, Italia. 154 p. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/x5595s/x5595s00.htm> [30 dic. 2017].
- Fonseca, E., Tierra, L. (2011). *Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz, y pruebas de producción de gas pobre*. Tesis para optar el título Ingeniero Mecánico. Facultad de Mecánica. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. 189 p.
- Fredes, N. (2014). *Evaluación técnica y económica de una planta de producción de combustible sólido a partir de biomasa forestal en la región de los lagos*. Memoria para optar el título de Ingeniera Civil química. Universidad de Chile. Facultad de ciencias físicas y matemáticas. Santiago de Chile. 143 p.
- Fundacion Pro Naturaleza (FPN). (2006). *Cadenas Productivas de Aguaje y Tagua*. 136 p.
- Gallipoliti, V., Martina, O., Corace, J., Aeberhardt, R., Garcia, E. (2004). *Fabricación de briquetas con aserrín blanco de pino. Análisis inmediato y obtención de su poder calorífico*. Grupo de investigación en energías renovables (GIDER) - Departamento de Termodinámica. Facultad de Ingeniería - UNNE. Resistencia, Chaco. 6 p.
- Hernández, J. (2011). *Estudio Técnico para la obtención de briquetas de fácil encendido a partir de carbón de la cascarilla de palma africana y su producción en la empresa TYSAL S.A*. Tesis de Grado Ingeniero Forestal. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba, Ecuador. 144 p.
- Jara, H. (2009) Biomasa y sus propiedades como combustible. *Revista Celulosa y Papel*.

- Mejia, K., Couturier, G., Delgado, C. (2007). *Mauritia flexuosa* (Arecaceae: calamoideae) an amazonian palm with cultivation purposes in Perú. Vol 62. <https://doi.org/10.1051/fruits:2007011>
- Rodriguez, A. (2010). *Optimización de producción de briquetas de carbón y biomasa*. Tesis de grado. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- Romahn, C. (1992). *Principales productos forestales no maderables de México*. Universidad Autónoma Chapingo. Edo. de México. 125-161 p.
- Rojas, V. (2004). *Prefactibilidad técnica y económica para la instalación de una planta de pellets para combustibles a partir de desechos de madera*. Tesis profesional. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. Chile. 128 p.
- Seijas, S., Seijas, P., Seijas, N., Chavez, A., Salgado, L., Alva, M. (2014). Optimización del proceso de densificación de desechos Lignocelulósicos para la conformación de Pellets Energéticos. Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Trujillo. *Sciendo*, 17(1), 74-81.
- Soto G, Núñez M. (2018). Fabricación de pellets de carbonilla, usando aserrín de *Pinus radiata* (D. Don), como material aglomerante. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 10(2): 129-137. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2008000200005>
- Valderrama, A., Curo, H., Etal, G. (2010). *Briquetas de residuos sólidos orgánicos como fuente de energía calorífica en cocinas no convencionales*. Centro de Desarrollo e Investigación en Termofluidos CEDIT. Lima, Perú.
- Zamora, G. (2010). Obtención de carbón activado a partir de semillas, de dos palmeras de la Amazonía Peruana, Shapaja (*Attalea phalera*) y Aguaje (*Mauritia flexuosa*). Tesis para optar el Título de Ingeniero Forestal. Universidad Nacional Agraria La Molina Facultad de Ciencias Forestales Lima. Pp. 41-42.
- Zelarayan, A. (2016). *Tratamiento de residuos de la producción pecuaria*. Bioenergía. El Tribuno. Argentina.

Cuadernos de la Red IBEROMASA

Optimización de los procesos de extracción de biomasa sólida para uso energético

PARTE C

Caracterización de materias primas

Solid biofuels characterization in Portugal

Elsa Cancela*, Teresa Almeida, Neuza Alves, Sónia Figo

Centro da Biomassa para a Energia (CBE), Zona Industrial de Valfeijão, 3220-119 Miranda do Corvo, Portugal.

*Autor para correspondencia: elsa.cancela@centrodabiomassa.pt

1. Introduction

Biomass is one of the main renewable energy sources in Portugal, representing about 12.7% of the total primary energy consumption. The Biomass Centre For Energy (CBE) was founded in 1989 with the aim of promoting the development of the bioenergy sector in Portugal. The CBE's Specialized Solid Biofuels Laboratory

(LEBS.CBE) provides analytical testing services for solid biofuels market. LEBS.CBE is accredited by the Portuguese Accreditation Institute (IPAC) for ISO 17025 referential standard. It has been conducting several R&D studies to provide the most complete data on biomass characteristics.

In this study different characteristics of different biomass feedstocks available in Portugal were evaluated, namely, total moisture; ash content; carbon, hydrogen and nitrogen total; sulfur and chlorine total; net calorific value; bulk density, mechanical durability and fines' content in pellets.

2. Materials and Methods

2.1. Analysed selected solid biofuels and parameters

The selected solid biofuels together with their codes are shown in Table 1.

Table 1. Biofuels codes.

Biofuel	CODE	Biofuel	CODE
Wood pellets	WP	Sawdust	S
Forest residues	FR	Briquettes	B
Wood chips	WC	Vineyard prunings	VP

The physical and chemical properties used for biomass characterization are shown in Table 2.

Table 2. Properties codes.

Property	CODE
Total moisture (as received)	HT
Ash content (dry)	ASH
Total carbon (dry)	C
Total hydrogen (dry)	H
Total nitrogen (dry)	N
Total sulfur (dry)	S
Total chlorine (dry)	Cl
Net calorific value (dry)	NCV
Bulk density (as received)	BD
Mechanical durability of pellets (as received)	DM
Fines content in pellets (as received)	F

There are other parameters for biofuels specifications and classes indicated in ISO Standards, but there is not representative information available at the moment. For this study, the number of samples used per biofuel and per property is shown in Table 3.

Table 3. Number of samples of each biofuel per property.

	WP	FR	WC	S	B	VP
HT	111	1485	45	13	13	18
ASH	111	1485	49	13	13	18
C	111	31	43	13	13	18
H	111	31	43	13	13	18
N	111	31	43	13	13	18
S	111	31	42	13	13	18
Cl	111	31	49	13	13	18
NCV	111	31	43	13	13	18
BD	92					
DM	82					
F	82					

2.2. Standards

The analytical samples were prepared according to ISO 14780 “Solid Biofuels - Sample preparation”. The sample preparation consists of homogenisation, dividing, milling and drying processes. The following table 4 shows the ISO standards used in the laboratory to characterise the samples.

Table 4. Standards by property

Property	Standard
Total moisture	ISO 18134-1:2017
Ash content	ISO 18122:2015
Carbon, hydrogen and nitrogen total	ISO 16948:2015
Sulfur and chlorine total	ISO 16994:2016
Net calorific value	ISO 18125:2017
Bulk density	ISO 17828:2015
Mechanical durability of pellets	ISO 17831-1:2015
Fines content in pellets	ISO 18846:2016

Parallel to the characterization of biofuels, this work compares the results with the quality standards when applicable, specifically with ISO 17225-2 (ISO, 2014a), ISO 17225-3 (ISO, 2014b) and ISO 17225-4 (ISO, 2014c), for wood pellets; wood briquettes and wood chips, respectively.

3. Results and Discussion

For each parameter, a statistical analysis was performed using a Box and whisker chart which shows the distribution of data into quartiles, highlighting the median and outliers.

3.1. Total moisture content

Results regarding the total moisture of the analysed samples are depicted in Figure 1.

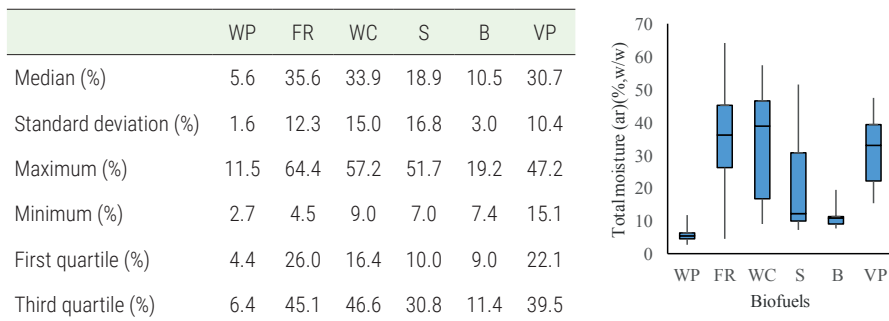


Figure 1. Results and Box and whisker plots of total moisture (as received) (% w/w).

As it can be seen in the previous figure, the results for wood pellets and briquettes samples are very similar and an important part of them respects the limits of total moisture for class A1 standards, which is $\leq 10\%$ for pellets and $\leq 12\%$ for briquettes. One of the main reasons for this is because a significant part of the analysed samples is certified products, therefore they are already required to comply with these limits.

At least 25% of wood chips samples meet the limit of $\leq 25\%$ moisture content indicated in ISO 17225-4 for A1 class, however wood chips samples shows a wide range of results (from 4.5 to 64.4%). Sawdust also shows a wide range of results for moisture content, between 7.0 and 51.7%. These occur mainly because of storage conditions.

For forest residues the wide range of moisture content values is resulting of the atmospheric conditions at the time of collection and storage conditions. The same occurs with vineyard pruning samples.

3.2. Ash content

Results regarding the ash content of the analysed samples are depicted in Figure 2.

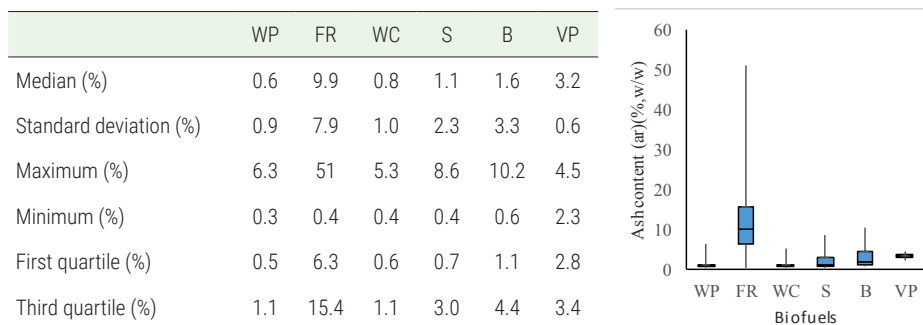


Figure 2. Results and Box and whisker plots of ash content (dry) (% w/w).

The most remarkable comment is that the ash content of forest residues is much higher than other solid biofuels, with a median value of 9.9% and a variation of results from 0.4 to 51.0%. This can be expected due to the significant heterogeneous nature of this biomass, as well as the collection and storage conditions. The vineyard prunings are mainly formed by twigs and small branches and leaves, which also increase ash level values, with median value of 3.2%.

Regarding wood pellets and wood chips samples, it can be verified that more than 50% of the analysed samples complies the ash content requirements of class A1 ISO standards (0.7% and 1.0%, respectively). Although not expected, the ash values observed in briquettes are generally higher and more dispersed than those obtained from wood chips and sawdust samples.

3.3. Total content of carbon and hydrogen

Results regarding the total content of carbon of the analysed samples are depicted in Figure 3.

	WP	FR	WC	S	B	VP
Median (%)	50.1	48.3	49.9	49.5	48.9	47.6
Standard deviation (%)	0.9	3.4	1.4	1.2	1.0	0.4
Maximum (%)	53.4	50.8	52.7	51.9	50.0	48.3
Minimum (%)	47.2	40.3	45.7	47.5	46.8	46.5
First quartile (%)	49.6	43.7	48.8	48.7	48.3	47.2
Third quartile (%)	50.6	49.7	50.9	50.4	49.3	47.7

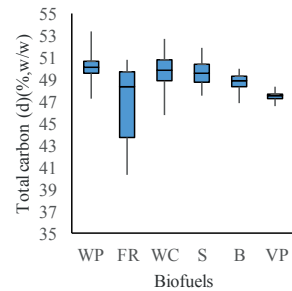


Figure 3. Results and Box and whisker plots of total content of carbon (dry) (% w/w).

Results regarding the total content of hydrogen of the analysed samples are depicted in Figure 4.

	WP	FR	WC	S	B	VP
Median (%)	6.2	5.9	6.1	6.0	6.1	6.0
Standard deviation (%)	0.3	0.5	0.2	0.2	0.1	0.1
Maximum (%)	8.4	6.4	7.1	6.3	6.3	6.1
Minimum (%)	5.8	4.7	5.7	5.6	5.9	5.9
First quartile (%)	6.1	5.4	6.0	5.9	6.0	6.0
Third quartile (%)	6.3	6.1	6.2	6.1	6.2	6.1

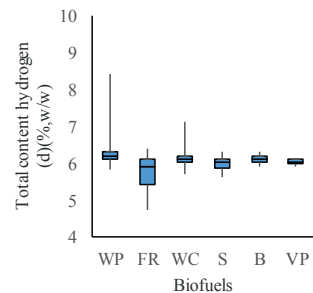


Figure 4. Results and Box and whisker plots of total content of hydrogen (dry) (% w/w).

In general, we could say that the carbon and hydrogen content in the different biofuels, with the exception of forest residue samples, is very similar and there is no dispersion in the observed results for each of the biofuels. Forest waste samples have very different characteristics from each other therefore, the results of hydrogen and carbon varies. The ISO 17225-2, ISO 17225-3 and ISO 17225-4 don't specify limits for carbon and hydrogen.

3.4. Total content of nitrogen

Results regarding the total content of nitrogen of the analysed samples are depicted in Figure 5.

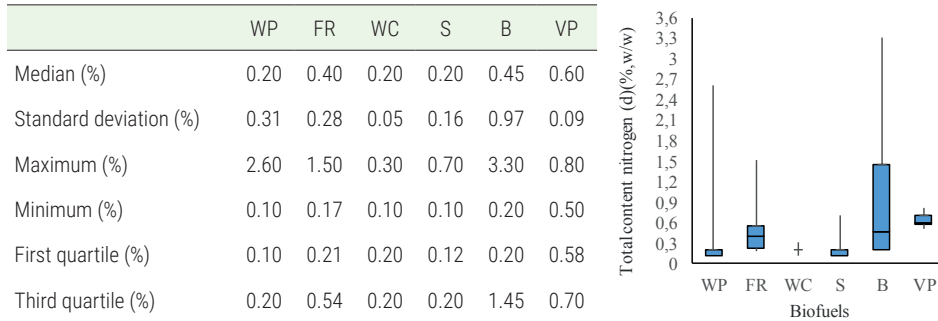


Figure 5. Results and Box and whisker plots of total content of nitrogen (dry) (% w/w).

The Figure 5 shows that more than 75% of wood pellets samples respect the limit of class A1 standards ($\leq 0.3\%$). The samples of wood chips respect the specifications the ISO 17225-4, when applicable. The presence of leaves in pruning vineyard and forest residues can explain the increased of nitrogen levels of these samples. The nitrogen results of sawdust are similar to wood pellets samples.

3.5. Total content of sulfur

Results regarding the total content of sulfur of the analysed samples are depicted in Figure 6.

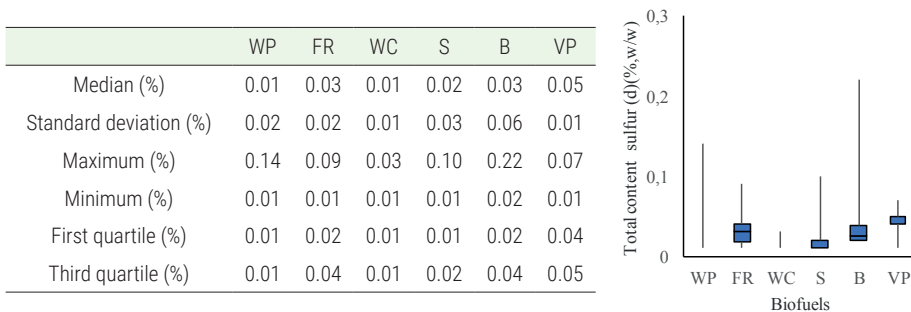


Figure 6. Results and Box and whisker plots of total content of sulfur (dry) (% w/w).

The results of wood pellets and wood chips samples are very consistent (ca. 0.01%). About 95% of results obtained in wood pellets respect the specification A1 class limit of wood pellets ($\leq 0.04\%$). Wood chips have specification of this parameter only for class B ($< 0.1\%$), and all samples respect this limit.

At least 75% of briquette samples respect the A1 class limits (0.04%) and at least 75% of sawdust results are less or equal than 0.02%. In case of the forest residues and vineyard prunings, leaves and small branches can increase the total sulfur content.

3.6. Total content of chlorine

Results regarding the total content of chlorine of the analysed samples are depicted in Figure 7.

	WP	FR	WC	S	B	VP
Median (%)	0.01	0.05	0.01	0.02	0.03	0.02
Standard deviation (%)	0.02	0.08	0.02	0.02	0.06	0.02
Maximum (%)	0.15	0.27	0.07	0.06	0.22	0.06
Minimum (%)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
First quartile (%)	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01
Third quartile (%)	0.02	0.13	0.04	0.05	0.04	0.04

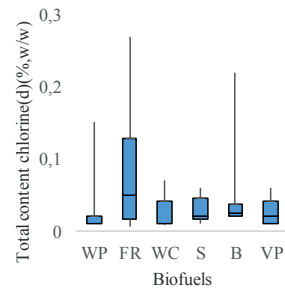


Figure 7. Results and Box and whisker plots of total content of chlorine (dry) (% w/w).

The alkaline chlorides cause corrosion of boilers, so it is very important to evaluate this parameter. ISO 17225-2:2014, ISO 17225-3: 2014 and ISO 17225-4: 2014 indicate the specification of chlorine for different biofuels.

More than 75% of wood pellets sample fulfils the specifications of ISO 17225-2:2014 ($\leq 0.02\%$) and only 5% shows results bigger than 0.03% (Class B). For wood chips, the ISO17225-4:2014 only has limit for chlorine in class B, which is 0.05%. More than 75% of samples fulfil this limit. Only 25% of the samples respect the class A limit for briquettes.

3.7. Net calorific value (NCV)

Results regarding the total content of net calorific value of the analysed samples are depicted in Figure 8.

	WP	FR	WC	S	B	VP
Median (%)	18.90	18.28	18.63	18.19	18.18	17.57
Standard deviation (%)	0.30	1.49	0.60	0.59	0.77	0.58
Maximum (%)	19.67	19.12	19.66	19.74	18.90	18.55
Minimum (%)	17.79	14.25	16.54	17.75	15.87	15.53
First quartile (%)	18.61	16.29	18.18	18.16	17.74	17.44
Third quartile (%)	19.02	18.68	19.00	19.06	18.44	17.70

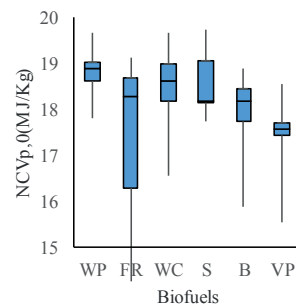


Figure 8. Results and Box and whisker plots of net calorific value (NCV) at constant pressure (as received) (MJ/Kg).

Samples of forest residues, wood chips, sawdust and vineyard pruning have more disperse net calorific value results than samples of wood pellets and briquettes, mainly because the moisture of these biofuels varies significantly, which has a direct impact in NCV result. In general, wood pellets and briquettes samples evaluated fulfil the standards on NCV parameter.

3.8. Physical properties for wood pellets

3.8.1. Bulk density

Results regarding bulk density of the analysed samples are depicted in Figure 9.

The maximum value obtained is 740kg/m³ and the minimum value obtained is 610 kg/m³. All results obtained for samples are respecting the A1 class limit of wood pellets (≥ 600 kg/m³). The median line is close to the third quartile so the distribution of results is negative asymmetric, i.e. the results are more disperse below 680 kg/m³ (median).

Bulk density (ar)	
Median (kg/m ³)	680
Standard deviation (kg/m ³)	22
Maximum (kg/m ³)	740
Minimum (kg/m ³)	610
First quartile (kg/m ³)	660
Third quartile (kg/m ³)	690

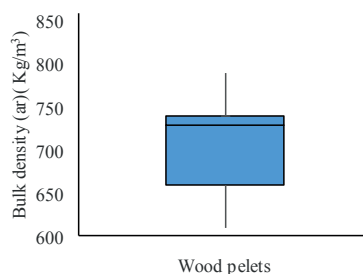


Figure 9. Results and Box and whisker plots of bulk density (as received) (kg/m³).

3.8.2. Mechanical durability

Results regarding mechanical durability of the analysed samples are depicted in Figure 10.

Mechanical durability (ar)	
Median (kg/m ³)	98.6
Standard deviation (kg/m ³)	0.7
Maximum (kg/m ³)	99.5
Minimum (kg/m ³)	94.7
First quartile (kg/m ³)	98.2
Third quartile (kg/m ³)	98.8

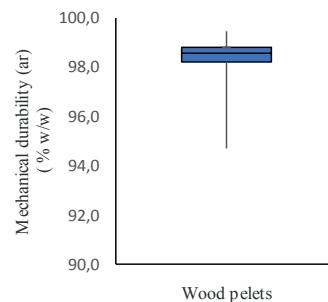


Figure 10. Results and Box and whisker plots of mechanical durability (%w/w).

The mechanical durability parameter was only evaluated for wood pellets. All results varies between 94.7 and 98.2%, and at least 75% fulfil A1 wood pellets limit ($\geq 97.5\%$).

3.8.3. Fines

Results regarding fines of the analysed samples are depicted in Figure 11.

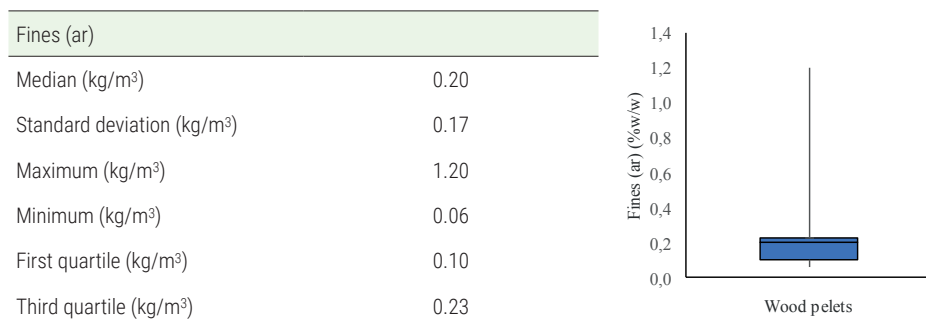


Figure 11. Results and Box and whisker plots of for fines (%w/w).

The fines' parameter is only evaluated for wood pellets. In general, the fines' parameter for wood pellets samples meet the quality requirements set in the ISO, which is for A1 class limit of wood pellets (1.0%). It is also possible to highlight that 75% of samples have a value less than or equal to 0.2% of fines.

4. Conclusion

Heterogeneity is an inherent characteristic of biomass which is used or can potentially be used to produce a large variety of biofuels. Quality control, quality requirements and quality certification systems are key elements for developing a sustainable market for solid biofuels. This issue is even more important in the residential heating sector, where quality biofuels are needed to ensure appropriate performance conditions of domestic heating appliances as small stoves or boilers.

References

- ISO 17225-2:2014. (2014a). Solid biofuels – Fuel Specification and Classes- Part 2: Graded wood pellets. ISO: International Organization for Standardization.
- ISO 17225-3:2014 (2014b). Solid biofuels – Fuel Specification and Classes- Part 3: Graded wood briquettes. ISO: International Organization for Standardization.
- ISO 17225-4:2014 (2014c). Solid biofuels – Fuel Specification and Classes- Part 4: Graded wood chips. ISO: International Organization for Standardization.

Evaluación preliminar de la calidad de astilla de madera como base para una estandarización de biocombustibles sólidos en México

Noel Carrillo Ávila^{1*}, María Elisa Cano², Abraham Pérez Martínez³, Artemio Carrillo Parra⁴, José Guadalupe Rutiaga⁵

¹Campo Experimental San Martinito, Puebla. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, México.

²División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo, México.

³Instituto Tecnológico Superior de Zongolica, México.

⁴Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera. Universidad Juárez del Estado de Durango, México.

⁵Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

*Autor para correspondencia: noelcarrillo@gmail.com

1. Antecedentes

El aporte de los bosques y selvas de México es equivalente a poco más de cinco veces los recursos de su energía primaria, mostrando la potencialidad que tiene la biomasa forestal sólida como una gran fuente de energía limpia (Masera *et al.*, 2010). Una modalidad de biocombustible es la astilla que producida de residuos forestales y que se usa con fines energéticos o bien como un producto intermedio en la fabricación de tableros o pellets. Con el avance tecnológico y procesos más eficientes para conversiones de materia a energía, es factible proyectar la utilización de la biomasa fresca en procesos económicamente competitivos ante los energéticos fosilizados, hecho con repercusiones ecológicas mucho menos alterantes en la química del ambiente (WBA, 2016). En el mundo, los recursos forestales participan con 47.4 EJ al año, aportando 87% de la bioenergía y que en conjunto representa 14.3% de la demanda energética del hombre civilizado. Las astillas de madera jugarán un papel muy importante y será necesario trabajar en estándares de calidad para

mejorar su comercialización y uso sobre los procesos que requieren energía térmica. En México aún se procesan a fuego directo más de 18 millones de metros cúbicos de madera (0.26 EJ) (Bharadwaj, 2014), por lo que la transición a usos con tecnologías mejoradas para la generación de calor en estufas y calefacción domiciliar tendrá que ir a la par de productos bioenergéticos estandarizados, además de cumplir con las calidades que demanda la competencia internacional.

2. Justificación

México no cuenta con estándares de caracterización in de clasificación de biocombustibles sólidos, su calidad y comercialización se hacen bajo medidas empíricas según la zona donde son producidos y distribuidos. Esto hace necesario desarrollar estudios para generar soporte ante productores forestales e industriales consumidores de biomasa forestal astillada, de tal forma que la industria se apegue a normatividades y pueda ofrecer productos en mercados certificados

3. Objetivo

En el presente trabajo fueron determinadas cinco características bioenergéticas para cinco procedencias de astilla de madera, dos de corteza particulada y aserrín residual de una industria forestal; todo con el objetivo de contar con parámetros base hacia una clasificación de biocombustibles nacional.

4. Metodología

Los materiales fueron preparados y determinados según los procedimientos de Europa UNE EN ISO y se obtuvo contenido porcentual para humedad *in-situ* y cenizas, además del poder calorífico, densidad aparente y la distribución en cuanto al tamaño de las partículas.

Para la determinación del contenido de humedad se usó la Norma Española UNE EN ISO 18134-2 (2017) y se procesaron fracciones de biomasa de 600 g, aproximadamente. Las muestras fueron sometidas a 102 °C hasta lograr peso constante y la humedad fue referida en base húmeda.

Para determinar el tamaño de las astillas se midieron entre 80 y 143 partículas registrando el peso o masa de cada pieza, así como sus tres dimensiones espaciales: espesor, amplitud y longitud. Una vez teniendo estas referencias se hizo una categorización según la norma europea UNE EN ISO 17225-4 Clases de astilla de madera versión corregida 2015.

Para la determinación de los valores para el contenido de cenizas se utilizó la metodología de estándar UNE EN ISO 18122, Determinación del contenido de ceniza (2016). El procedimiento consistió en conseguir las fracciones de humedad y cenizas según el cambio gravimétrico después de aplicar energía térmica por tiempos y condiciones especificadas.

La cantidad de energía por unidad de masa, se determinó con un Calorímetro Parr modelo 6100. El principio se basa en obtener las unidades de energía (MJ kg⁻¹), partiendo de que el equipo utilizado cuenta con un calor específico definido y el cual se utiliza para determinar el valor energético según la variación de energía térmica registrada por la combustión de la biomasa (1 g). Se utilizó la norma UNE-EN 14918 (2011) para esta prueba.

5. Resultados y discusión

En la Tabla 1 se muestran los resultados del presente estudio, de las ocho procedencias de biomasa solo dos presentaron contenidos de humedad ideales para procesos de combustión, el resto no cuenta con manejo en cuanto al contenido total de humedad. El rango de esta variable fue desde 7.24 hasta 44.97%. Si se orienta uso energético de este tipo de biocombustibles, será necesario aplicar algún proceso de acondicionamiento para la pérdida de humedad.

Tabla 1. Resultado de evaluación de características de astilla para México.

ID	Tipo de Astilla	Humedad <i>In-situ</i> (%)	Ceniza (%)	Densidad (kg/m ³)	Poder Calorífico (MJ/kg)	Clase de astilla
1	Astilla de pino sin corteza 1	43.53	0.46	199.62	20.55	P45S
2	Corteza de pino particulada 1	22.48	1.12	228.08	21.56	Fuera de clases
3	Astilla de pino de molino martillos	7.53	0.64	275.96	20.54	Fuera de clases
4	Viruta de pino	7.24	0.41	66.58	19.78	Fuera de clases
5	Astilla de chapa de pino	42.26	0.53	192.16	20.17	Fuera de clases
6	Aserrín de pino	44.97	0.72	223.18	20.71	Fuera de clases
7	Corteza de pino particulada 2	28.58	1.18	238.39	22.00	Fuera de clases
8	Astilla de pino sin corteza 2	31.21	0.37	153.44	20.49	Fuera de clases

La densidad aparente de las muestras procesadas se encuentra en un rango de 192.16 hasta 275.96 kg/m³, excepto un biocombustible que registró un valor de 66.58 kg/m³ y que corresponde a viruta de pino procedente de cepillado de elementos de muebles.

La astilla nacional aún no se apega a las especificaciones de estandarización por tamaño, es necesario establecer una operación de cribado y molienda para eliminar impurezas y bajar el promedio de las longitudes. Los dispositivos modernos que queman astilla requieren un combustible de menores tamaños para lograr mejor eficiencia durante la combustión. Sólo una procedencia de astilla logró tipificar como clase P45S, la más baja que propone la norma europea (Figura 1).

El poder calorífico obtenido para los grupos de astilla colectados coincide con los que se reportan para el género *Pinus*. Estos valores representan tangiblemente el potencial energético de los residuos biomásicos como fuentes energéticas limpias y distribuidamente disponibles para el sector rural de México.

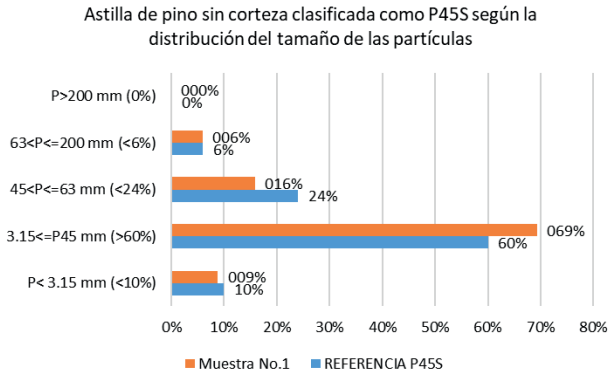


Figura 1. Clasificación como P45S según norma española de clase por distribución de tamaño de partículas de madera en una y única procedencia evaluada dentro de este estudio.

Excepto para las cortezas, el contenido de cenizas resultó de primera calidad, ya que se considera clase primera a los biocombustibles que contienen menos de uno por ciento de cenizas en su matriz fibrosa. La astilla que se genera a partir de las especies del género *Pinus* en México tiene la ventaja de que este parámetro es cubierto sin mayor dificultad. La naturaleza biológica de los componentes minerales de las astillas de pino le imprimen buena proyección hacia la producción de biocombustibles de alta calidad.

Agradecimientos

Las erogaciones para toma de datos en campo, así como los equipos para llevar a cabo los experimentos de laboratorio fueron financiados por el Fondo de Sustentabilidad Energética de la Secretaría de Energía y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, a través del Proyecto Clúster de biocombustibles sólidos para la generación térmica y eléctrica, con número de referencia 2014-246911.

Bibliografía

- Bharadwaj Kummamuru, V. (2014). *Global Bioenergy Statistics* (WBA). Stockholm, Sweden. 39p.
- Masera, O., Arias, T., Ghilardi, A., Guerrero, G., Patiño, P. (2010). *Estimación de los consumos nacionales de leña y carbón vegetal para el periodo 2009-2024*. Morelia, México: UNAM.
- World Bioenergy Association. (2014). *The role of bioenergy in the global energy mix*. Stockholm, Sweden, p.39.

Caracterización Mofológica del Fruto de Mamey (*Mammea americana* L.)

Ángela R. Zarraga Bello*, Raúl A. Camacho Marín,
Patricio A. Merino Cordova, Wilson A. Loor Reasco

Universidad Nacional Experimental "Francisco de Miranda" UNEFM - Venezuela.

*Autor para correspondencia: angelazarraga047@gmail.com

1. Introducción

El mamey (*Mammea Americana* L.) es oriundo de las Antillas y Norte de Sudamérica. Se encuentra diseminado por todos los países del Caribe hasta Florida y desde México hasta Brasil. De América ha ido a las regiones tropicales del Viejo Mundo (Hoyos, 1994). Pertenece a la familia Guttiferae, que constituye una de las más dominantes en la flora venezolana (Avilán et al., 1992).

Es un árbol mediano o grande, 15-25 m de altura, el tronco erecto, con la copa frondosa, densa de color verde-oscuro (Tronco recto). Corteza de color castaño o gris, varía desde un tanto lisa hasta ligeramente agrietada; corteza interna de color castaño claro o color rosado y sabor amargo. Al hacer alguna incisión en las hojas, desprende un látex de color amarillo-pálido. La madera presenta la albura blancuzca y el duramen o madera vieja de color marrón a rojizo; es duro y pesado. Hojas opuestas, oblongas elípticas, de 10-15 cm de largo, 5-10 de ancho, ápice obtuso o redondeado y base obtusa hasta aguda, coriáceas, toda la hoja con glándulas pelúcidas entre las nervaduras, peciolo, 1-1.5 de largo cm de largo. Flores son axilares, sésiles; se presentan solitarias o unas pocas juntas, 1-3 flores polígamas, pedicelo 10-15 mm de largo. Dos sépalos valvados de 1.2-1.6 cm de largo, los pétalos de 4 a 6, blancos anchos, de 1.5-2 cm de longitud. Los estambres son numerosos, libres o unidos en su base, ovario, es de 2 a 4 celdas, con 1 o 2 óvulos en cada celda, el estilo es corto y está sobremontado por un estigma entero o ampliamente peltado con cuatro lóbulos. Los frutos son del tipo de las drupas, globosos a redondeados, de 8 a 15 cm de diámetros cuelgan de un fuerte y corto pedúnculo; exocarpio grueso y de color marrón-terroso; mesocarpio amarillo-vivo o rojizo, comestibles, dulce y olor aromático. La pulpa del

fruto es de sabor agradable, dulce a subácido. Semillas de 1 a 4, grandes, de sabor amargo (Avilán et al., 1992; Hoyos, 1994).

En Venezuela no existe tradición de cultivo del mamey, aun cuando desde el punto de vista ecológico, su cultivo ayudaría a la conservación de la biodiversidad de las especies vegetales en las zonas donde crece de manera natural y al mismo tiempo se evitaría que algunos genotipos con valor potencial se pierdan. En el municipio Zamora del estado Falcón, existen árboles de mamey básicamente en pequeños huertos familiares y patios, en fincas y en plantaciones con otros frutales, normalmente no existe como cultivo único. Habitualmente se encuentra como ornamental alrededor de casas, plazas y a lo largo de caminos y carreteras por sus hojas verdes, oscuras y brillantes, formando un denso follaje. Sus frutos no se comercializan, solamente se utilizan para la elaboración artesanal de dulces y en menor grado para el consumo como fruta fresca, sin que esta actividad represente ingresos a los propietarios.

Desde el punto de vista ecológico, es importante impulsar el cultivo de esta especie porque permite ayudar a mantener la diversidad genética y evitar que algunos genotipos con valor potencial desaparezcan. El establecimiento de esta especie como cultivo en sistemas de producción tradicional para ser consumida como fruta fresca o sirve para la preparación de ensaladas de frutas, conservas, helados, pastas, rellenos para pasteles, vinos, sorbetes y bebidas ello permitirá mantener un desarrollo frutícola sostenible y desarrollo agroindustrial (Francis, 1989).

De valor nutritivo mediano, la pulpa es rica en vitaminas A, C y B2. A partir de las flores se puede preparar un licor. La madera de color rojizo a púrpura (duramen) con grano fino, es dura, pesada y excelente para construcciones, artesanías, ebanistería y tornería. El árbol es utilizado a menudo como cortina rompevientos o planta ornamental. Las semillas y la resina exudada por el árbol contienen ingredientes insecticidas potentes. Las semillas, hojas y flores preparadas de diferentes maneras, son utilizadas como remedios caseros para facilitar la digestión, controlar diferentes enfermedades y problemas de piel o la fiebre (UNAH, 1999). Por otro lado, en estudios recientes se analizó la capacidad de la biomasa de la cáscara de mamey para disminuir la concentración inicial de Cromo, después de 1 hora de incubación, la biomasa disminuye la concentración inicial del metal, hasta niveles indetectables (Sandoval et al., 2010).

En el campo de la medicina, según estudios realizados en tres diferentes extractos (etanólicos, metanólicos y diclorometanos) obtenidos de *Mammea americana* en el tratamiento de trastornos gastrointestinales causadas por diversos factores, se demostró la capacidad de los compuestos presentes como tratamiento en todos los tipos de úlceras gástricas (Toma, 2005)

En la actualidad, en el estado Falcón, no existen planes para promover el cultivo y para aprovechar la cosecha. Así como tampoco existen estudios sobre la calidad del fruto en la zona, es por ello que se considera importante, la caracterización a través de los principales parámetros físico-químicos del fruto de mamey. En tal sentido, este trabajo se propuso caracterizar los parámetros físicos del fruto de mamey, a fin de sentar las bases para futuras investigaciones acerca de su potencialidad como cultivo.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción del área de muestreo

La presente investigación consistió en un estudio descriptivo que se realizó en la parroquia Pueblo Cumarebo, Municipio Zamora, del estado Falcón Venezuela, en los sectores: Güiní, Santo Domingo, Soropo, Cerro Pelón y La Montaña de los Indios. Esta parroquia está ubicada a una altitud de 100 a 500 msnm, con una vegetación intervenida, con clima marítimo de Barlovento y con suelos xerosoles (FUDECO, 2004). Con relación al clima, los registros disponibles indican precipitación media anual de 979.3 mm, con variaciones que van desde 26.3 mm en el mes más seco (marzo) a 185 mm en el mes más lluvioso (diciembre), encontrándose el período de máxima precipitación entre el mes de octubre y diciembre. La temperatura media anual es de 26.03 °C, con una máxima de 27.5 °C en el mes de septiembre y una mínima de 24.2 °C en el mes de enero, presentándose los mayores valores de temperatura entre agosto y septiembre y los menores entre enero y abril (Muñoz, 2002).

2.2. Diseño de muestreo

El área de estudio lo conformaron los sectores de Güiní, Santo Domingo, Soropo, Cerro Pelón y La Montaña de los Indios. Los frutos se cosecharon de plantas silvestres, con edad entre 30 a 60 años de edad, según información suministrada por los habitantes de los diferentes sectores, las cuales se estima que producen alrededor de 150 frutos/planta al año.

Se seleccionaron 6 plantas por sector, en el cual de cada árbol se colectaron 8 frutos maduros, para un total de 48 frutos por sector. Una vez colectados los 48 frutos, se seleccionó una muestra al azar de 10 frutos, los cuales se llevaron al laboratorio de suelo donde se lavaron con una solución de hipoclorito de sodio 3%, se secaron con papel absorbente, para luego proceder a determinar los respectivos parámetros físicos.

2.3. Variables evaluadas

Las variables se determinaron de manera individual en cada fruto.

- **Masa del fruto**, del exocarpio, de las semillas y del mesocarpio [g] se determinó en una balanza analítica marca Sauter Sm 1000.
- **Tamaño del fruto** [cm].
Se determinaron las dimensiones diámetro polar y diámetro ecuatorial, medidas en centímetro (cm) con un vernier con apreciación de 0-150 mm.
- **Relación diámetro polar/diámetro ecuatorial del fruto**.
Por cociente simple y directo.
- **Color del exocarpio y del mesocarpio**.
Se determinó por apreciación visual llevándose un registro fotográfico y usando una escala hedónica del 1 al 3, siendo 1: amarillo claro; 2: amarillo y 3: amarillo intenso (Figura 1).



Figura 1. Intensidad del color amarillo de la pulpa de frutos de mamey (*Mammea americana* L.), en madurez de consumo.

- **Grosor del exocarpio y del mesocarpio** [cm].
Se midió con un vernier tanto el grosor del exocarpio y del mesocarpio.
- **Número de semillas**, por conteo simple en cada fruto.



(A) Detalle del aspecto interno del fruto



(B) Determinación del grosor del mesocarpio.

Figura 2. Características físicas internas del fruto de mamey (*Mammea americana* L.).

- **Tamaño de la semilla** [cm].
De determinó con un vernier tanto el diámetro polar como el diámetro ecuatorial de todas las semillas por fruto.



A) Frutos con dos semillas



(B) Fruto con cuatro semillas

Figura 3. Número de semillas presentes en frutos de de mamey (*Mammea americana* L.).

3. Resultados y discusión

En el Tabla 1, se muestran los promedios de las características externas del fruto. La mayor masa promedio de fruto, corresponde al sector de Santo Domingo con rangos hasta 725 g; el resto de los valores se encuentran en un rango entre 418.40 - 570.00 g. En este sector, se observa variabilidad en el indicador analizado, el cual se evidencia en los valores máximo y mínimos correspondientes (Tabla 2).

Estos resultados fueron similares a los encontrados en Guatemala por Sosof et al. (2005) quienes reportaron valores de masa del mesocarpio o pulpa entre 338.9 - 683.2 g y a los reportados por Cedeño y Viteri (2009) (653.23 ± 0.25). Por el contrario, los promedios de tamaño y masa registrados en este estudio fueron mayores ($458.80 \text{ g} \pm 128.81 \text{ g}$) a los reportados por Mourão y Beltrani (2000) en Brasil, quienes encontraron frutos con masa promedio de $350.22 \text{ g} \pm 120.81 \text{ g}$ de mesocarpio.

Los frutos del sector de Soropo presentaron el promedio más alto del diámetro polar. Entre los otros sectores, los valores promedios estuvieron entre 9.03-10.17 cm. Mientras que, en el diámetro ecuatorial, el promedio más alto correspondió a los frutos del sector de Santo Domingo. Para los otros sectores los valores promedios estuvieron entre 9.80- 11.06 cm (Tabla 1). Los frutos del sector Güiní mostraron mayor variabilidad (Tabla 2). En este caso los resultados muestran frutos de menor tamaño a los reportados por Mourão y Beltrani (2000) quienes señalaron tamaño de fruto de 10 - 20 cm, mientras que para los sectores del estudio se registraron valores máximos de diámetro de 13.40 cm. En tal sentido, debe hacerse la acotación que las plantas muestreadas además de ser bastante longevas, son silvestres, sin ningún manejo agronómico que pudiera favorecer la calidad de los frutos.

Con respecto a la forma, los frutos del sector Soropo presentaron una tendencia a ser redonda; mientras que en Cerro Pelón hubo una gran variabilidad de formas, que van desde achatada hasta ovalada (Tabla 1). Otros autores han señalado que los frutos del mamey son bayas de forma esférica, oblonga y oblongo redondo (Sosof et al., 2005; Díaz, 2004; Mourão y Beltrani, 2000) similares a los encontrados en este estudio.

El promedio más alto de la masa del epicarpio correspondió al sector Santo Domingo y el menor a los provenientes de Cerro Pelón. Entre los otros sectores, los valores promedios de masa de la piel estuvieron entre 99.8 - 126.6 g.

El mayor grosor del epicarpio y del mesocarpio del fruto correspondió al sector de Soropo (0.49 -1.58 cm), con relación al grosor del epicarpio de los frutos mostraron valores muy cercanos a 0.38 - 0.40 cm (Tabla 1). No obstante, en este sector hubo una gran variabilidad (Tabla 2).

Los frutos con mayor grosor del mesocarpio correspondieron al sector Soropo con 1.58 cm. En los otros sectores, los valores promedios estuvieron entre 1.43 y 1.52 cm. Sin embargo, cuando se analizó la masa del mesocarpio, el promedio más alto corresponde a los del sector de Santo Domingo, lo cual pudiera indicar que este fue más compacto. Entre los otros sectores, los valores promedios de la masa del mesocarpio estuvieron entre 246.20 g y 333.80 g (Tabla 1).

Tabla 1. Promedios de la masa del fruto, exocarpio y mesocarpio, diámetro polar, ecuatorial y su relación, grosor del exocarpio y mesocarpio, en frutos de mamey (*Mammea americana* L.), provenientes de cinco sectores de la parroquia Cumarebo.

Sectores	Parámetros							
	Masa (g)		Diámetro (cm)			Grosor (cm)		
	Fruto m ± Ds	Pulpa m ± Ds	Piel m ± Ds	Φ polar m ± Ds	Φ ecuatorial m ± Ds	Φpol/Φec	Pulpa m ± Ds	Piel m ± Ds
Güiní	541.00±213.33	309.00±141.9	115.80±45.92	9.46±1.34	11.03±1.53	0.86±0.05	0.38±0.05	1.43±0.31
Soropo	570.00±92.87	333.80±52.02	126.60±35.83	10.38±0.55	11.06±0.50	0.94±0.04	0.49±0.14	1.58±0.32
Cer,Pel	529.40±143.25	314.20±93.34	99.80±24.06	9.50±0.63	10.87±0.97	0.88±0.09	0.46±0.15	1.52±0.42
Sant.Dom	725.00±191.72	458.80±128.8	129.80±30.29	10.17±1.01	12.05±0.78	0.84±0.05	0.40±0.05	1.38±0.21
Mon. Indi	418.40±73.62	246.20±51.53	109.00±14.55	9.03±0.64	9.80±0.97	0.93±0.10	0.49±0.09	1.44±0.26

Tabla 2. Valores máximos y mínimos de la masa del fruto, exocarpio y mesocarpio, diámetro polar, ecuatorial y su relación, grosor del exocarpio y mesocarpio en frutos de mamey (*Mammea americana* L.), provenientes de cinco sectores de la parroquia Cumarebo.

Variable	Valor	Güiní	Soropo	Cer. Pel	Sto. Dom	Mon. Indi
Masa del fruto (g)	Máx	974	702.00	860.00	1032.00	532.00
	Mín	306.00	384.00	366.00	474.00	276.00
Φ polar del fruto (cm)	Máx	11.62	11.35	10.62	11.68	10.32
	Mín	7.36	9.20	8.49	8.94	8.29
Φ ecuatorial del fru (cm)	Máx	13.40	11.65	12.24	13.24	11.11
	Mín	9.22	10.36	8.85	10.82	8.29
Φ polar/ Φ ecuat del fruto	Máx	0.94	1.00	1.11	0.90	1.07
	Mín	0.80	0.89	0.79	0.77	0.80
Masa de la piel (g)	Máx	194.00	214.00	140.00	174.00	130.00
	Mín	72.00	84.00	72.00	92.00	86.00
Grosor de la piel (cm)	Máx	0.48	0.82	0.75	0.49	0.64
	Mín	0.29	0.32	0.32	0.32	0.38
Grosor de la pulpa (cm)	Máx	1.99	2.14	2.42	1.74	1.93
	Mín	1.00	1.00	1.15	1.09	1.16
Masa de la pulpa (g)	Máx	634.00	402.00	526.00	684.00	316.00
	Mín	170.00	224.00	222.00	300.00	154.00

Φ polar= Diámetro polar del fruto; Φ ecuat= Diámetro ecuatorial del fruto; Φpol/Φec= Relación diámetro polar/diámetro ecuatorial del fruto.

En el Tabla 3 se muestran la moda de algunas características externas e internas del fruto. Como se puede observar, la moda del número de semilla por fruto fue entre 1 a 3 semillas; Cabe destacar que en los sectores Cerro Pelón y Santo Domingo, se encontró hasta 5 semillas por fruto (Tabla 4).

Con relación a las características de la semilla, correspondió a los del sector de Santo Domingo el mayor promedio de la masa total de semilla por fruto. Entre los otros sectores, los valores estuvieron entre 61.00 - 113.80 g. Mientras que la mayor masa promedio de semilla por fruto, correspondió a los del sector de Güiní mientras que en los otros sectores el valor promedio osciló entre 36.31 - 41.57 g (Tabla 3). Se observó una gran variabilidad en las características antes mencionadas en frutos provenientes de un mismo sector (Tabla 4).

En cuanto a las características de tamaño y forma de la semilla, los valores oscilaron alrededor de 5.78 y 5.36 cm; en todos los casos los promedios del diámetro polar estuvieron muy cercanos, mientras que el diámetro ecuatorial el promedio estuvo entre 3.75 y 4.34 cm. En todos los casos se observó, que las semillas fueron ovaladas (relación diámetro polar/diámetro ecuatorial mayor a 1) (Tabla 3).

Tabla 3. Moda del numero de semillas y promedio total de masa de semillas; masa promedio de semillas; diámetro polar, ecuatorial y su relación, y masa del desecho en frutos de mamey (*Mammea americana* L.), provenientes de cinco sectores de la parroquia Cumarebo.

Sectores	Núm.	Parámetros						
		Masa (g)		Diámetro (cm)			Desecho	
		Total	Promedio	Φ polar	Φ ecuatorial	Φpol/Φec	Masa (g)	%
Güiní ± Ds	3	113.80±37.75	45.67±14.36	5.61±0.59	4.10±0.48	1.37±0.08	229.60±80.92	42.44
Soropo ± Ds	3	105.80±29.29	38.72±10.05	5.78±0.50	3.88±0.47	1.50±0.14	232.40±48.90	40.77
Cer,Pel ± Ds	2	113.20±49.38	36.31±7.14	5.36±0.42	3.75±0.39	1.44±0.14	213.00±70.42	40.23
Sant.Dom ± Ds	2	131.40±40.97	41.38±4.23	5.43±0.47	4.07±0.25	1.34±0.12	261.20±69.21	36.03
Mon. Indi ± Ds	1	61.00±18.43	41.57±13.64	5.08±0.48	4.34±0.59	1.18±0.14	170.00±30.91	40.63

Como se puede observar, se encontraron frutos de diferentes tamaño, masa y número de semillas. Según Avilán et al. (1992), Hoyos (1994) Sosof et al. (2005); Mourão y Beltrani (2000) los frutos de mamey pueden presentar de una a cuatro semillas; no obstante, se encontraron frutos que tienen de una a cinco semillas, con masas promedios entre 36.31 ± 7.14 y 45.67 ± 14.36 g inferiores a los encontrados por Mourão y Beltrani (2000) quienes reportaron promedios de 53.57 ± 17.75 g y a lo registrado por Cedeño y Viteri (2009) (51.63 ± 14.95 g). El tamaño promedio de las semillas fue similar a lo registrado por Mourão y Beltrani (2000), 5.68 ± 0.67 cm de largo por 4.35 ± 0.58 cm. El diámetro polar estuvo entre 5.08 ± 0.48 y 5.78 ± 0.50 cm y el ecuatorial entre 3.88 ± 0.47 y 4.34 ± 0.59 cm. Por su parte Cedeño y Viteri (2009) registraron promedios mayores para el tamaño de la semilla (6.11 ± 0.94 cm de largo y 4.19 ± 0.56 cm de ancho).

Tabla 4. Valores máximos y mínimos de N° de semillas, masa total y promedio por semilla, diámetro polar, ecuatorial, su relación y el desecho en frutos de mamey (*Mammea americana* L.), provenientes de cinco sectores de la parroquia Cumarebo.

Variable	Valor	Güini	Soropo	Cer. Pel	Sto. Dom	Mon. Indi
N° de sem	Máx	3	4	5	5	3
	Mín	2	2	2	2	1
Masa total de sem (g)	Máx	168.00	154.00	200.00	194.00	92.00
	Mín	62.00	74.00	58.00	80.00	30.00
Mp. Sem (g)	Máx	80.00	51.33	50.00	48.67	62.00
	Mín	31.00	24.50	27.33	36.00	22.00
Φ polar de sem (cm)	Máx	6.51	6.50	6.23	6.18	5.90
	Mín	4.69	5.01	4.74	4.63	4.31
Φ ecuat de sem (cm)	Máx	5.06	4.60	4.31	4.45	5.41
	Mín	3.55	2.88	3.22	3.69	3.64
Φpol/Φec de sem	Máx	1.50	1.81	1.69	1.50	1.39
	Mín	1.29	1.30	1.21	1.09	0.89
Desecho (g)	Máx	350.00	298.00	332.00	354.00	214.00
	Mín	134.00	158.00	130.00	174.00	122.00

N° de sem= Número de semillas del fruto; Masa total sem= Masa total de semilla; Mp. Sem= Masa promedio de la semilla; Φ polar= Diámetro polar de la semilla; Φ ecuat= Diámetro ecuatorial de la semilla; Φpol/Φec= Relación diámetro polar /diámetro ecuatorial de la semilla; Desecho= Desecho del fruto.

El sector donde la moda registró mayor desecho del fruto correspondió a Santo Domingo con rango de 354.00 – 174.00, mientras que el sector Montaña de los Indios mostró el menor valor con rango de 214.00 - 122.00 g; respectivamente. En el Cuadro 4, se muestran los valores máximos y mínimos de estas variables.

La moda del color del mesocarpio se muestra en el Tabla 5. Sólo en el sector Santo Domingo no se encontró presencia del color amarillo intenso (3). De acuerdo con la FAO (2006) la pulpa del mamey tiene un color amarillo claro o anaranjado, lo que difiere de lo encontrado, se reportan tres colores diferentes amarillo claro, amarillo y amarillo intenso.

Tabla 5. Moda del color de pulpa en frutos de mamey (*Mammea americana* L.), provenientes de cinco sectores de la parroquia Cumarebo.

Sector	Color de la pulpa
Güini	2
Soropo	1
Cerro Pelón	3
Santo Domingo	1
Montaña del Indio	2

El color del exocarpio fue muy similar en todos los casos (Figura 2). Díaz (2004) señala que entre muchas de las curiosidades de este fruto es que se hace poco menos que imposible conocer el punto de maduración, toda vez que su corteza no permite comprobar el ablandamiento a la presión de los dedos, ni tampoco su apariencia, pues el color de la piel no sufre alteración alguna cuando alcanza su plena madurez.

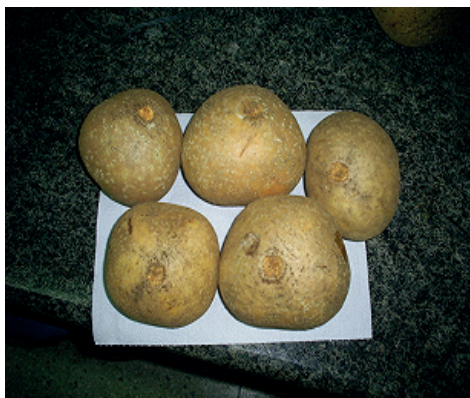


Figura 4. Color de la piel del fruto de mamey (*Mammea americana* L.).

4. Conclusiones

De acuerdo a la caracterización física del fruto de mamey (*Mammea americana* L.), se pudo observar una amplia variabilidad en los parámetros estudiados, excepto el color de la piel del fruto que fue muy similar en todos los casos.

En promedio los frutos de mayor masa se encontraron en el sector Santo Domingo, del mismo modo estos fueron los que presentaron mayor diámetro ecuatorial y masa de la pulpa, mientras que los frutos del sector Montaña de los Indios fueron los que presentaron menor promedio de masa, diámetro polar y ecuatorial, y masa de la pulpa.

Se encontraron frutos de 1 a 3 semillas en promedio, aunque hubo frutos de hasta 5 semillas. De manera general pudiera decirse que las características de la semilla fueron relativamente similares en los cinco sectores.

Referencias

Avilán, L., Leal, F., Bautista, D. (1992). Guttiferae. En *Manual de Fruticultura. Principios y Manejo de la Producción*. Editorial America. 2ª edición. Tomo I. Maracay. pp. 659-665.

- Cedeño Luzardo, E.M., Viteri Herrera, K.V. (2009). *Estudio del comportamiento de la pulpa congelada y del aceite de semillas obtenido de dos variedades diferentes de mamey Colocarpum mammosum (mamey colorado) y Mammea americana (mamey cartagena)*. Trabajo de Grado para optar al título de Ingenieras de Alimentos. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción. 133 p. (en línea) Disponible en: http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/11339/1/tesis%20completa_revisada_.docx [Consultado en abril de 2011].
- Díaz Robledo, J. (2004). *Descubre los frutos exóticos*. Capitel Editores. pp. 178.
- FAO, (2006). Disponible en: <http://www.fao.org/inpho/content/documents/> [Consultado en Febrero, 2011].
- FUDECO, (2004). Disponible en: <http://www.fudeco.gob.ve/estados/falcon/municipios/pdf> [Consultado en noviembre 2010].
- Francis, J. (1989). *Mammea americana* L. *Mamey, mammee-apple*. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. New Orleans. 4 p. Disponible en: <http://www.fs.fed.us/global/iitf/Mammeaamericana.pdf> (Consultado en septiembre, 2010).
- Hoyos, J. (1994). Mamey. En *Frutales en Venezuela*. Editorial sociedad de ciencias naturales la salle. 2ª edición. Caracas-Venezuela. pp. 114-115.
- Mourão, K.S.M., Beltrani, C.M. (2000). Morphology and anatomy of developing fruits and seeds of *Mammea americana* L. (Clusiaceae). *Rev. Brasil. Biol.*, 60(4): 701-711. <https://doi.org/10.1590/S0034-71082000000400023>
- Muñoz, B. (2002). *Clasificación con fines de riego de los suelos del sector "El Garabato", cuenca baja del río Acarigua, Municipio Autónomo Zamora, Estado Falcón*. Trabajo especial de grado para optar al título de Ing. Agrónomo. UNEFM, 30-34 pp.
- Sandoval Ibarra, P., Bautista Mata, D., Hernández Arvizu, N., Cárdenas González, J.F., Martínez Juárez, V.M., Acosta Rodríguez, I. (2010). *Reducción de cromo (VI) por la cáscara de mamey (Mammea americana L.)*. Disponible en: <http://www.dcb.rsip.ipn.mx/encuentro/resumenes/ambiental/carteles/Cardenas%20Gonzalez%20Juan%20Fernando.pdf> (Consultado en Marzo, 2011).
- Sosof, J.R., Otzoy, M.R., Fajardo, F.J. (2005). *Estudio de la variabilidad y preservación de cultivares de mamey (Mammea americana L.), en la región suroccidental de Guatemala. Instituto de Investigación y Desarrollo de Suroccidente*. Proyectos de Investigación 2005. DIGI – USAC. Disponible en: http://digi.usac.edu.gt/bvirtual/digirevista_files/index_archivos/Revista/Informes2002-2006/Informes2005/%C1reaT%E9cnica/mamey.pdf (Consultado: septiembre, 2010).
- Toma W., C. A. Hiruma-Lima, R. O. Guerrero y A. R. M. Souza Brito. (2005). Preliminary studies of *Mammea americana* L. (Guttiferae) bark/latex extract point to an effective antiulcer effect on gastric ulcer models in mice. *Phyto*, 12(5):345-50. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2003.06.009>
- Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH). (1999). *Frutales y condimentarías del trópico húmedo*. Centro Universitario Regional del Litoral Atlántico. Honduras. 345p.

Cuadernos de la Red IBEROMASA

Optimización de los procesos de extracción de biomasa sólida para uso energético

PARTE D

Resúmenes encuentro de investigadores Guayaquil 2019

Resumen ponencia: Caracterización de residuos maderables

José Guadalupe Rutiaga Quiñones

Clúster de Biocombustibles Sólidos. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.

*Autor para correspondencia: jrutiaga@yahoo.com.mx

El Clúster de Biocombustibles Sólidos es apoyado por la Secretaría de Energía y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México y cuenta con cinco líneas de investigación. En la línea 2 denominada “Caracterización y estandarización de biocombustibles sólidos para la generación térmica y eléctrica” participan la Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), en Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, Puebla) y la empresa Citricos EX, S. A. de C. V. (CITREX). Los objetivos de esta línea son: 1. Determinar las propiedades físicas, mecánicas y químicas de astillas, carbón vegetal, pellets y briquetas (BCS) de diferentes especies. 2. Generar estándares de calidad para uso nacional de BCS. 3. Transferir los resultados e información científica a las empresas y otros sectores de la sociedad. 4. Establecer un laboratorio de referencia nacional para la determinación de calidad de BCS. 5. Formar recursos humanos. Para este taller se comparten algunas experiencias de la línea 2. El equipo de trabajo se dio a la tarea de recolectar residuos maderables, derivados del procesamiento mecánico de la madera de *Pinus* spp., *Quercus* spp. y algunas maderas tropicales, en ocho estados del país. Los análisis realizados en las muestras recolectadas comprendieron la determinación de humedad, granulometría, densidad a granel, contenido de cenizas, microanálisis de las cenizas, volátiles, análisis elemental, poder calorífico y análisis químico básico. En general los resultados obtenidos coinciden con datos reportados en la literatura para especies de madera del mismo género o misma especie. Con los materiales lignocelulósicos recolectados se elaboraron pellets y briquetas (elaboradas en una máquina Lippel). La caracterización de estos materiales densificados está en proceso y los resultados correspondientes a las briquetas indican que su densidad varía de 1049 a 1208 kg/m³ y el poder calorífico fluctúa de 20 a 22.8 MJ/kg. A continuación se comparte una experiencia llevada a cabo en la comunidad indígena de San Francisco Pichátaro, en el estado de Michoacán, México. En esta comunidad existen 100 talleres que

trabajan la madera y elaboran muebles artesanales. En el proceso de trabajabilidad de la madera se generan aproximadamente 5.5 toneladas de aserrín y 8.4 toneladas de viruta por mes. En general estos residuos no tienen uso. Encuestas aplicadas a los talleres y a la comunidad revelan que la madera que más utilizan corresponde a *Pinus* spp. y los residuos los utilizan para calentar agua, principalmente. La mayoría utiliza leña de pino para cocinar sus alimentos diariamente. Así, se realizó un trabajo para elaborar briquetas artesanales con estos materiales y realizar con ellas pruebas de combustión y determinar los gases de efecto invernadero, con la finalidad de poder sustituir en consumo de leña por el uso de estas briquetas. Estos materiales densificados elaborados presentaron una densidad que varía de 930 a 1240 kg/m³. En la prueba de combustión la briqueta alcanzó 330°C en 20 minutos, mientras que la leña de pino alcanzó 178°C en el mismo tiempo. Por otra parte, la tasa de emisión de gases de efecto invernadero y material particulado fue menor en las briquetas que en la leña. Finalmente se llevó a cabo una prueba de cocinado controlado en una estufa Patsari, utilizando briquetas para preparar tortillas a partir de 3 kg de masa. Aquí se concluye que las briquetas tuvieron buen desempeño en la tarea de cocción.

Resumen ponencia: Plataforma Web Geoespacial para estimación de oferta y demanda de biomasa

Raúl Tauro*, Roberto Rangel, Rodrigo Suárez, José Luis Caballero, Miguel Salinas, Adrián Ghilardi

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental – CIGA. Universidad Nacional Autónoma de México - UNAM Campus Morelia, México.

*Autor para correspondencia: rjtauro@gmail.com

La biomasa se encuentra distribuida ampliamente y de una manera no homogénea en el espacio geográfico, debido principalmente a su producción estacional, su carácter casi perecedero y factores tanto biofísicos como humanos que determina su distribución y abundancia. Los sistemas de información geográfica (SIG) han demostrado poder ser útiles para evaluar la disponibilidad de los BCS, su ubicación geográfica, su régimen de propiedad, sus limitaciones de uso, y de esta manera promover el aprovechamiento sustentable de los recursos bioenergéticos. Sin embargo, para poder usar estos SIG, es necesario acceder a software con licencias costosas, además de contar con personal especializado. Como parte del proyecto del Cluster de Biocombustibles Sólidos de México, la línea de investigación "L1" está desarrollando una plataforma web cuyo principal objetivo es realizar estimaciones estadísticamente robustas y espacialmente explícitas del potencial teórico y técnico de una serie de recursos biomásicos disponibles en México para la generación de calor y electricidad en tecnologías de mediana y alta potencia. La plataforma geoespacial cuenta con los siguientes aspectos originales: 1) un panel de administración amigable para el usuario, el cual permite la utilización y apropiación del sistema por terceros, 2) un módulo que permite hacer comparaciones espaciales entre la oferta y la demanda de diferentes recursos biomásicos. Este último módulo conjunta en una sola herramienta completamente personalizable diferentes tecnologías de transformación de biomasa en energía, como son: la selección de áreas y cálculos de insumos en formato raster y vectorial, así como filtros espaciales que permiten establecer criterios de sustentabilidad. Se obtiene como resultado una herramienta de análisis alineada a las políticas energéticas del país, que permite apoyar a los tomadores de decisiones, académicos, empresarios y todos aquellos interesados que

deseen valorar el potencial de generación de bioenergía en México. La plataforma web así mismo, contará con un módulo para la simulación de escenarios prospectivos para leña y carbón vegetal y con un módulo que permitirá obtener la localización de centrales eléctricas de la manera más óptima posible.

Investigación e Innovación en Biocombustibles Sólidos para la transición energética de México

Daniel Cohen Salgado*, Omar Masera Cerutti

Grupo de Innovación Ecotecnológica y Bioenergía (GIEB)- Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES)- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.

*Autor para correspondencia: dcohen@cieceo.unam.mx

1. Introducción

Los BCS se han establecido como energéticos importantes en México, con una variedad de usos finales en distintos sectores, tanto tradicionales (calefacción y cocción de alimentos con leña), como modernos (generación de calor y electricidad con astillas en industrias de distintos sectores), generando aproximadamente 480 PJ de energía en nuestro país (10% del consumo total)¹¹. Su importancia recae en sus capacidades para:

- Proporcionar energía a los sectores residencial, industrial y eléctrico, en forma de calor y electricidad
- Aprovechar residuos de otras actividades económicas como agroindustrias o aserraderos, resolviendo los problemas ambientales asociados a su disposición.
- Ser almacenados para ser utilizados cuando se necesitan, lo que permite planificar y dar certidumbre a su suministro.
- Ser transformados o procesados para aumentar su densidad energética, reducir costos de logística y facilitar su manejo
- Ser producidos y utilizados local o regionalmente, evitando su traslado a grandes distancias
- Mitigar emisiones de gases de efecto invernadero
- Generar beneficios sociales y económicos, al diversificar las economías rurales y crear oportunidades de empleo a lo largo de la cadena de producción.

¹¹ Balance Nacional de Energía (2014)- Secretaría de Energía. Consultado en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44353/Balance_Nacional_de_Energia_a_2014.pdf. México: SENER.

Considerando estos elementos, se puso en marcha el Proyecto *Clúster de Biocombustibles Sólidos (BCS)*, que busca entender y difundir las múltiples ventajas que ofrecen los BCS, en comparación con otros combustibles renovables o limpios, para lograr que cubran una cuarta parte de la demanda energética nacional de calor y electricidad en 2030, y así cumplir metas de sustentabilidad, creando empleos y reduciendo emisiones GEI.

Este Proyecto también busca constituirse como un centro dinamizador del proceso de transición energética de México, innovando con responsabilidad social con respecto a la generación y utilización sostenible y eficiente de energía térmica y eléctrica a partir de biocombustibles sólidos. En sus líneas estratégicas, busca proveer de información, detonando procesos de innovación tecnológica, capacitación, criterios de decisión, propuestas de políticas públicas, formando a su vez recursos humanos en los más altos niveles técnicos y científicos.

2. Descripción del Proyecto

El Clúster de Biocombustibles Sólidos está conformado por 13 instituciones nacionales y 2 extranjeras, así como 3 empresas (Ver Anexo 1 con las entidades participantes). A la fecha, tiene 239 integrantes organizados en 5 líneas de trabajo (ver Figura 1), que son las siguientes:

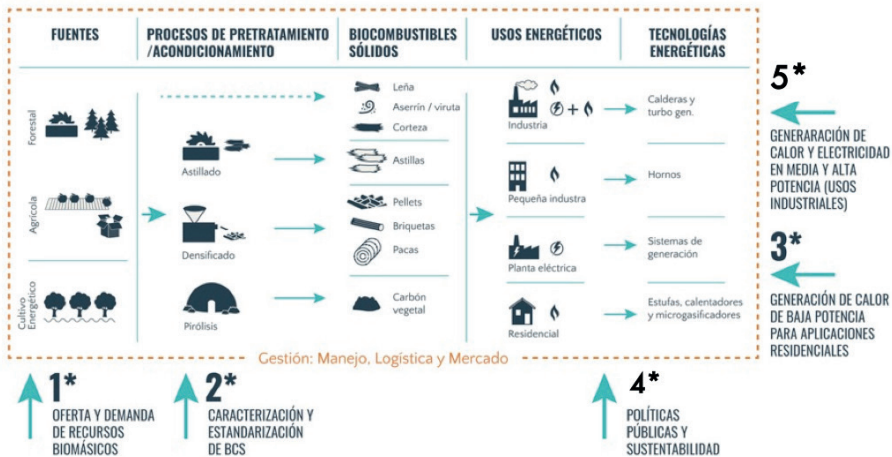


Figura 1. Líneas temáticas para el entendimiento integral del potencial de los biocombustibles sólidos en la transición energética.

- **Línea 1. Oferta y demanda de Recursos Biomásicos.** Genera estimaciones robustas, especialmente explícitas y con proyección a futuro, del potencial técnico y económico de una serie de recursos biomásicos disponibles en México para generar calor y electricidad.

- **Línea 2. Caracterización y estandarización de BCS.** Establece los laboratorios y protocolos para evaluar BCS y proponer estándares de calidad.
- **Línea 3. Generación de calor de baja potencia para aplicaciones residenciales.** Desarrolla, valida y transfiere tecnologías aptas para aplicaciones térmicas de baja potencia en el sector residencial
- **Línea 4. Políticas públicas y sustentabilidad.** Evalúa la sostenibilidad de la producción y el uso de BCS, sus impactos y beneficios, para informar a los tomadores de decisiones.
- **Línea 5. Generación de calor y electricidad en media y alta potencia (usos industriales).** Evalúa el estado de la generación de calor y electricidad en media y alta potencia (su tecnología y procesos) y propone posibles mejoras

El proyecto recibe recursos del Fondo de Sustentabilidad Energética (FSE), conformado por la Secretaría de Energía y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México.

3. Resultados e Impactos preliminares

El proyecto ha tenido impactos a distintas escalas y en diferentes ámbitos, como se muestra en la Figura 2. Solo se mencionarán algunos elementos destacables del trabajo realizado hasta el momento.



Figura 2. Impactos del Clúster de BCS.

Se han terminado y publicado 24 artículos de investigación originales y dos capítulos de libro, resultado del esfuerzo en contribuir a la investigación en biocombustibles sólidos en nuestro país.

El Clúster también ha establecido cinco estudios de caso generales, que abarcan desde el sector residencial/local, hasta grandes empresas. Estos estudios de caso han sido abordados de manera interdisciplinaria por diferentes líneas temáticas, obteniendo productos como análisis de factibilidad técnico-económica, análisis de ciclo de vida, e indicadores de sustentabilidad, entre otros.

El Proyecto también está fortaleciendo las redes de investigación en Bioenergía, tanto nacionales (Red Mexicana de Bioenergía, Red Temática de Bioenergía) como internacionales (Organización Latinoamericana de Energía, Red Latinoamericana de Cocinas Limpias, Clean Cooking Forum, Research for Global Sustainability, Red IBEROMASA, etc.); organizando talleres con expertos, y promoviendo la comunicación entre líneas de trabajo, y con investigadores externos. El consorcio promueve un trabajo novedoso de innovación incluyente con los usuarios rurales, principalmente mujeres, que descentraliza la investigación en bioenergía, y fortalece los grupos de investigación de las universidades estatales de varias regiones del país.

Una de las metas más importantes para el Clúster es la formación de recursos humanos con alto nivel técnico, objetivo que hasta el momento incluye 22 estudiantes activos y 11 que ya se graduaron.

Considerando que es fundamental brindar información a los tomadores de decisiones para avanzar en la disseminación de los BCS en nuestro país, el Clúster ha participado en la construcción de distintos reportes de análisis que aportan a la implementación de políticas públicas, como el Mapa de Ruta Tecnológico de BCS de la Secretaría de Energía, el Libro de Estado del Arte de la Bioenergía en México, el Manual para Evaluar las Emisiones de las Estufas tipo plancha y la primera Norma Mexicana para Estufas Eficientes de Leña.

Los recursos del Clúster también han sido utilizados para fortalecer la infraestructura en las diferentes instituciones participantes, con la instalación y modernización de cinco laboratorios de determinación de propiedades físicas, químicas y energéticas de BCS; diseño y modelación de dispositivos; modelación y evaluación de la oferta y demanda de biomasa; planificación ambiental y caracterización energética.

El componente de vinculación también ha sido atendido por el Proyecto, con la creación de una página web oficial (www.clusterbcs.com) y dos redes sociales (Twitter y Facebook), y la implementación de un boletín mensual (newsletter). La página ha sido visitada más de 8000 veces y los seguidores en redes sociales superan los 800, con un crecimiento orgánico.

Otros productos concretos incluyen una plataforma geo-espacial única en su género internacionalmente, que resume la información de oferta y demanda de recursos biomásicos, utilizando una interfaz amigable al usuario y accesible al público en general. También se han aprovechado las herramientas y software existentes en el mercado para avanzar en el diseño y modelado de dispositivos, considerando principios de dinámica de flujos y proyecciones en 3D. De forma paralela, se han desarrollado dos aplicaciones para Android para el levantamiento de datos en campo, utilizados para los análisis de ciclo de vida y la evaluación participativa de dispositivos.

El Clúster ha logrado innovar en el sector de la cocción tradicional con leña, con la participación de los usuarios de forma inclusiva y colectiva, obteniendo varios modelos de dispositivos eficientes que tendrán un alto impacto social. También ha colaborado en iniciativas que han tenido resultados tangibles, como en el caso de la primera planta de cogeneración con BCS que se instaló en una empresa forestal formada por 40 Ejidos y Comunidades forestales en Durango, proyecto en el que el Clúster brindó apoyo técnico fundamental para lograr resultados concretos.

Anexo 1. Entidades que integran el Clúster de Biocombustibles Sólidos



