



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



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



Trabajos de investigación 2020

Red IBEROMASA

Cuadernos de la
Red IBEROMASA



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

Trabajos de investigación 2020
Red IBEROMASA

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



Cuadernos de la RED IBEROMASA

Optimización de los procesos de extracción de biomasa sólida para uso energético.
Trabajos de investigación 2020.

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: 978-84-15413-44-8

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.....v

PARTE A: Cultivos energéticos y otras fuentes de materia prima

Producción alta y sostenible de bioenergía mediante el uso de especies vegetales de crecimiento rápido 3

Julio César Ríos Saucedo, Rigoberto Rosales Serna, Saúl Santana Espinoza, Pablo Alfredo Domínguez Martínez, Rafael Jiménez Ocampo y Artemio Carrillo Parra

Potencial energético de residuos de ocho cultivos agrícolas en México 33

Artemio Carrillo-Parra, Víctor Daniel Núñez-Retana, José Ángel Prieto-Ruíz y Fortunato Garza-Ocañas

Condiciones de cultivo del Sauce (*Salix* sp.) 77

Isabel López-Cortés, Domingo M. Salazar Hernández y Borja Velázquez-Martí

Condiciones de cultivo del Chopo (*Populus* sp.) 83

Isabel López-Cortés, Domingo M. Salazar Hernández y Borja Velázquez-Martí

Bambú una alternativa de biomasa para energía en el Perú 89

Mary Flor Césare Coral y Héctor Enrique Gonzales Mora

Current Status of Sugarcane (*Saccharum* spp.) Breeding under Sustainable Conditions in Argentina 129

Alberto Acevedo, Catalina Molina, José María García, María Laura Federico y Luis Erazzú

Contenido energético de biomasa del fuste proveniente de plantaciones de eucalipto de corta rotación en Uruguay 149

Fernando Resquin, Rafael M. Navarro-Cerrillo, Leónidas Carrasco-Letelier y Cecilia Rachid-Casnati

Evaluación del potencial uso de la cáscara de arroz para el abastecimiento eléctrico a los molinos arroceros en la Provincia de Entre Ríos. Argentina 175

Carñel G.E, Alessandri G., Duarte O.C., Francia A. y Díaz E.L.

Cuantificación y caracterización del residuo industrial de corteza de origen forestal en la margen argentina del río Uruguay, y su potencialidad bioenergética 185

Díaz O. A., Martín M. S. y D. Bechelli

Contenido

PARTE B: Optimización de los procesos de extracción de biomasa sólida para uso energético

Producción de energía eléctrica a partir de biomasa forestal. Caso de estudio. Parque industrial Santa Rosa. Corrientes. Argentina	203
Díaz E. L., Duarte O. C. y Carñel G. E.	
Estimación del potencial de biogás a partir de tambos en la provincia de Entre Ríos con destino al autoconsumo.....	217
Cruañez M. J. y Barlatey M. A.	
Microalgas y sus potenciales aplicaciones en Biorrefinerías.....	229
Xavier Álvarez Montero, Ingrid Mercado Reyes y José Carbo Pincay	
Valorización energética de la tusa del maíz (<i>Zea mays</i>) en la provincia de Los Ríos y Guayas, Ecuador.....	275
José Alfonso Martillo Aseffe, René Lesme Jaén y Luis Oscar Oliva Ruiz	

Prólogo

En este libro se presentan algunos de los trabajos de investigación realizados durante el año 2020 en la red IBEROMASA del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Este año ha sido especialmente difícil debido a que a nivel mundial nos hemos visto envueltos en una pandemia sanitaria, provocada por el COVID-19, que ha limitado mucho la actividad de las instituciones y empresas que conforman la red. Además de estar envueltos en una crisis económica que ha afectado también a los presupuestos, ha impedido la movilidad de los investigadores, no sólo en la red, sino que además la mayoría de ellos se han visto obligados a trabajar desde sus casas. Sin embargo, a pesar de la adversidad, esta publicación es el resultado del compromiso que tienen los investigadores con la sociedad y el entorno, demostrando que la actividad de investigación obedece a un espíritu desinteresado y con actitud de servicio.

En este libro se presentan trabajos enfocados al análisis de la sostenibilidad del aprovechamiento de recursos orgánicos, no fosilizados, para la obtención de biocombustibles, y contribuir al sostenimiento de nuestra sociedad no solo desde el punto de vista energético, sino también a través de la contribución de este sector en el desarrollo de las zonas rurales.

Como es sabido, la utilización de la biomasa procedente del medio agrícola y del medio forestal posee un potencial muy importante para la producción de energía con la reducción de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera que provoca el efecto invernadero. El aprovechamiento de estos recursos va ligado al análisis los distintos sistemas de producción, estudiando la cantidad de materiales que se generan, el coste de su producción, sistemas de recolección y transporte, sistemas de transformación en biocombustibles, además del efecto que puede ejercer sobre las economías de los distintos países y regiones. Espero que los esfuerzos realizados sean incentivos para trabajos futuros e impulso para el emprendimiento empresarial y fuente de desarrollo económico.

Quiero poner en relevancia que lo aquí presentado es resultado de un trabajo conjunto de los países de Iberoamérica trabajando en red. Eso es muy importante. En un mundo globalizado el trabajo de investigación en red constituye una de las herramientas esenciales para el desarrollo y la obtención de los mejores resultados. En este sentido, los instrumentos que ofrecen los distintos organismos para la interacción entre los grupos de trabajo de todos los puntos del planeta son elementos esenciales para contrastar ideas, aprender de todas las experiencias, y acercar a los distintos pueblos y culturas en un objetivo común, que es colaborar por mejorar nuestro entorno, calidad de vida, y el sostenimiento de

nuestro planeta. Por esa razón quisiera agradecer a CYTED el apoyo a las instituciones de Iberoamérica a través de su financiación para permitir este trabajo.

Los objetivos de la red IBEROMASA de CYTED están enmarcados y vinculados a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): Erradicar la pobreza en todas sus formas en todo el mundo. Poner fin al hambre, conseguir la seguridad alimentaria y una mejor nutrición, y promover la agricultura sostenible. Garantizar una vida saludable y promover el bienestar para todos y todas en todas las edades. Esta publicación también pretende ser un grano de arena a la consecución de tales metas.

Quiero agradecer a los investigadores de la red los esfuerzos realizados en esta obra, que animan a seguir trabajando con un equipo de personas excelente, comprometido, demostrando su gran valía. La experiencia de trabajo con ellos durante este año me ha confor-
tado, y en la distancia ha permitido la cohesión de un grupo de extraordinarias capacidades, lleno de calidad humana. Mis mas sinceras felicitaciones por los resultados obtenidos. Con mi mayor consideración.

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

Producción alta y sostenible de bioenergía mediante el uso de especies vegetales de crecimiento rápido

**Julio César Ríos Saucedo^{1*}, Rigoberto Rosales Serna¹,
Saúl Santana Espinoza¹, Pablo Alfredo Domínguez Martínez¹,
Rafael Jiménez Ocampo¹ y Artemio Carrillo Parra²**

¹INIFAP-Durango, Campo Experimental Valle del Guadiana (CEVAG), km 4.5 Ctra. Durango-El Mezquital, 34170, Durango, México.

²Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera (ISIMA), Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), Boulevard del Guadiana, 501, Colonia Torre de Institutos, 34120. Durango, México.

*Autor para correspondencia: rios.julio@inifap.gob.mx

1. Introducción

En México, la tasa de deforestación alcanza un promedio de 155 mil hectáreas anuales (PND, 2013). La reducción de la cubierta forestal es uno de los problemas más preocupantes en diferentes países, por su relación con el calentamiento global. Dicha reducción, ha sido ocasionada principalmente por la extracción de insumos necesarios para la generación de energía, así como por el cambio en el uso del suelo para la realización de actividades agrícolas y ganaderas. Además, se considera que cerca del 70 % del matorral de las zonas semiáridas de México presentan cierto nivel de deterioro, lo que afecta el rendimiento y biodiversidad en los sistemas productivos de los sectores agropecuario y forestal (SEMARNAT, 2015).

El bosque templado muestra perturbación considerable debido a la presión ejercida por la extracción de madera, leña, materia orgánica y humus, así como por la disponibilidad baja de biocombustibles en México (Aguilar, 2017). Se considera que la superficie perturbada alcanza 2.2 millones de hectáreas en los bosques templados del estado de Durango (SEMARNAT, 2014), el cual es considerado como la reserva forestal más importante de México. Por ello, se ha promovido el establecimiento de plantaciones forestales comerciales, principalmente en terrenos agrícolas. Lo anterior, con la finalidad de revertir la perturbación del bosque, disminuir costos de producción e incrementar la disponibilidad de biomasa para la industria maderera y la generación de bioenergía.

Actualmente, se busca identificar especies de crecimiento rápido para incrementar la eficiencia en diferentes actividades económicas, las cuales necesitan disponibilidad alta de biomasa para abastecer los requerimientos energéticos. La producción de biomasa enfrenta diferentes problemas, entre los que se pueden mencionar el desconocimiento de las especies productoras de biomasa energética, disponibilidad reducida de planta de calidad para establecer plantaciones comerciales y falta de tecnología para optimizar la producción y procesamiento eficiente de cada especie.

La selección de plantas de crecimiento rápido para la producción de biomasa debe incluir la evaluación de la especie vegetal y sus interacciones con el ambiente de producción. El ambiente incluye diferentes factores que modulan la respuesta de una especie vegetal determinada, entre los cuales se pueden mencionar el tipo de suelo, disponibilidad de agua y nutrientes, así como la influencia de patógenos e insectos plaga. Por ello, se requiere la modernización de la tecnología de manejo de especies de crecimiento rápido con la finalidad de optimizar el rendimiento, reducir costos y contribuir a la sostenibilidad productiva de biomasa con cultivos energéticos.

2. Antecedentes

El estado de Durango tiene el potencial para incrementar la competitividad forestal, agropecuaria e industrial, mediante la producción alta y sostenible de biomasa. Con ello, se reducirán los costos de producción mediante el uso de materias primas, biocombustibles, forrajes y abonos orgánicos de precio bajo y preferentemente elaborados en forma local a partir de materiales lignocelulósicos obtenidos en forma intensiva. Se conoce como biomasa vegetal al conjunto heterogéneo de materiales orgánicos que se producen a partir de plantas que crecen en un pasado inmediato, así como a los productos derivados de dichos materiales (Romero, 2010). En la actualidad, se considera necesario identificar especies vegetales de crecimiento rápido, es decir que muestren capacidad alta para la producción de biomasa lignocelulósica en un periodo corto de tiempo y que además, utilicen de forma eficiente los recursos del ambiente en el que se desarrollan.

Se han evaluado especies de plantas herbáceas, arbustivas y arbóreas que muestran capacidad alta para la acumulación de biomasa, cuando se utilizan en plantaciones de tipo comercial. Dichas especies vegetales deben evaluarse en sistemas intensivos, con el fin de establecer su utilidad en la producción alta y sostenible de biomasa con fines energéticos. Además, se ha trabajado en la generación de tecnología que permita el cultivo de dichas especies desde la producción de planta en vivero hasta la cosecha, procesamiento y uso de la biomasa vegetal. En algunos viveros forestales de México se cuenta con tecnología escasa para la producción de planta de calidad, que sea útil en el establecimiento exitoso de plantaciones con cultivos energéticos de tipo comercial. Por tal motivo, se inició la adaptación de la tecnología con el fin de facilitar la reproducción de especies locales e introducidas que muestren adaptación en condiciones intensivas de manejo. Dichas especies deben tener crecimiento rápido y facilidad para su reproducción a partir de semilla, plántulas y partes vegetativas (brotes, estacas, varetas y esquejes). Las especies deben adaptarse para su establecimiento en densidades altas de población y mostrar utilidad en la producción intensiva

de biomasa de calidad para la elaboración de biocombustibles, productos industriales y abono agrícola. Con ello, se contribuirá a la sostenibilidad de la agricultura, incremento de la competitividad y desarrollo económico en México.

3. Importancia de la Producción de Biomasa en México

En la actualidad, la mayor parte de las labores domésticas y uso de maquinaria agrícola dependen de energía generada a partir de combustibles fósiles. Por ello, se han incrementado considerablemente los costos de producción y se ha ocasionado daño ambiental por las emisiones contaminantes. México es un país megadiverso, donde es posible encontrar especies vegetales útiles en la elaboración de biocombustibles (Reveles *et al.*, 2010). En la actualidad, se requieren especies con productividad alta de biomasa, en condiciones de manejo con uso mínimo de insumos, para reducir costos y obtener un balance de carbono aceptable. Con la producción intensiva se logrará que, en espacios pequeños, se obtengan cantidades altas de biomasa para usos diferentes.

La producción intensiva de biomasa es un requerimiento actual en México, que tiene como finalidad reducir la presión humana ejercida sobre diferentes ecosistemas. Lo anterior, debido a que la mayoría de las comunidades vegetales de México muestran perturbación considerable por la extracción constante y prolongada de productos generados a partir de materiales lignocelulósicos. Con base en lo anterior, se han identificado especies adaptadas en sistemas de producción intensiva en diferentes regiones agro-ecológicas de México. Dichas especies cumplen con características agronómicas, productivas y de calidad que requieren los agricultores, industriales y usuarios de los bienes generados a partir de la biomasa.

4. Importancia de la Producción de Biomasa en Durango

En Durango, se determinó la necesidad de la realización de estudios sistemáticos para la identificación de fuentes alternativas de biomasa, que se produzcan de forma intensiva sin competir con la alimentación humana y animal (forraje). La biomasa es apreciada por la diversidad de usos, como son: insumo para la industria maderera, biocombustible, material de construcción, forraje para el ganado y abono orgánico (composta, humus, tierra de monte). Se tiene planeado seleccionar especies vegetales para producir biomasa de forma eficiente y caracterizar su calidad e importancia para de uso industrial, energético, forrajero y como abono orgánico.

Se ha observado que los factores ambientales de tipo abiótico (agua, suelo y temperatura) muestran influencia alta sobre la eficiencia en la producción de biomasa. Se ha demostrado que la lluvia acumulada durante el ciclo de cultivo, primavera-verano, limita el crecimiento de las especies utilizadas para la producción de biomasa energética, por lo que se requiere riego para incrementar el crecimiento y desarrollo de las plantas. El riego presurizado por goteo es una opción para incrementar la productividad del agua en las especies cultivadas, debido a que tiene una eficiencia en la aplicación de hasta 95 % (Rosales

y Flores, 2017). El uso de esta tecnología favorece la sostenibilidad de la producción agropecuaria y forestal, aunque el requerimiento de inversión inicial desalienta su utilización por parte del productor.

La mayoría de los suelos agrícolas de Durango tienen profundidad reducida (<30 cm), son arenosos y muestran fertilidad baja, lo cual en combinación con el pH alcalino reduce la disponibilidad de algunos minerales como el fósforo, manganeso, hierro y boro (Taiz y Zeiger, 2010). Se ha establecido que la incorporación de materia orgánica mejora las propiedades físico-químicas del suelo, por lo que se incrementa la infiltración y retención de agua, así como la disponibilidad de nutrientes, con lo que se optimiza la productividad de biomasa energética (Reyes *et al.*, 2019). Las variaciones diarias y estacionales de temperatura registradas en el altiplano semiárido de México limitan el crecimiento y desarrollo de diferentes especies vegetales, usadas en la producción de biomasa. Lo anterior, debido al incremento de la demanda hídrica en los meses más cálidos (mayo-agosto) y daños por heladas, las cuales son causadas por la disminución considerable de la temperatura mínima, entre los meses de octubre y marzo.

5. Importancia energética

Los biocombustibles son compuestos capaces de liberar energía durante su incineración, pueden ser sólidos, líquidos y gaseosos. Dichos carburantes provienen de materiales biológicos que se produjeron en la época actual, a diferencia de los combustibles fósiles que fueron generados hace millones de años. Los biocombustibles tienen su origen en plantas cultivadas, madera, biomasa y otras fuentes orgánicas de obtención reciente, como es el caso de los desechos metabólicos de animales domésticos y algas oleaginosas (Montes, 2003; Lourenço *et al.*, 2007; UCS, 2007; Zinoviev *et al.*, 2007; Benemann, 2008). Los biocombustibles son utilizados en varios países como alternativa para suplir, parcial o completamente, los sistemas energéticos basados en combustibles fósiles (Lourenço *et al.*, 2007).

Se han establecido diferentes parámetros que determinan, directa e indirectamente, la calidad energética de la biomasa y con ello, se establece su utilidad en la elaboración de biocombustibles. Algunas variables que pueden utilizarse indirectamente para evaluar la calidad de los biocombustibles son la fibra en detergente neutro (FDN), fibra en detergente ácido (FDA), hemicelulosa, celulosa y lignina (Tabla 1). Los resultados han demostrado la relación directa entre el contenido energético de la biomasa con las variables lignina y poder calorífico superior (Quirino *et al.*, 2005). En estudios realizados en Durango sobresalieron por su calidad energética el sauce, álamo blanco e higuierilla (Ríos *et al.*, 2019). Otras variables como FDN, FDA, hemicelulosa y celulosa se evalúan para calcular el contenido de lignina, aunque su utilidad es baja en la determinación directa de la calidad energética de la biomasa. Lo anterior, puede observarse debido a que las especies con valores altos para dichas variables, no necesariamente presentan nivel alto del poder calorífico superior.

Tabla 1. Atributos de calidad bioenergética de la biomasa obtenida en diferentes especies cultivadas en densidades altas de plantación.

Especie	¹ FDN (%)	FDA (%)	H (%)	CEL (%)	LIG (%)	PCS (mJ/kg)	C:N
Sauce	62.0 ^{ab}	49.3 ^b	8.9 ^c	33.1 ^{bc}	20.1 ^a	20.1 ^a	16.1 ^b
Álamo Blanco	68.3 ^b	54.4 ^{ab}	10.1 ^{bc}	38.4 ^{abc}	19.7 ^a	19.2 ^{ab}	18.7 ^{ab}
Higuerilla	52.5 ^c	38.4 ^c	11.2 ^{bc}	29.2 ^c	12.0 ^b	19.4 ^{ab}	13.1 ^b
Acacia	74.5 ^a	58.0 ^a	11.7 ^b	38.8 ^a	24.0 ^a	19.0 ^b	12.6 ^b
Maralfalfa	79.5 ^a	53.1 ^{ab}	22.3 ^a	41.0 ^{ab}	16.2 ^b	16.6 ^c	22.9 ^a
Promedio	67.4	50.6	12.8	36.1	18.4	18.8	16.7

¹FDN = fibra en detergente neutro, FDA = fibra en detergente ácido, H= hemicelulosa, CEL = celulosa, LIG = lignina, PCS = poder calorífico superior y C:N= balance carbono:nitrógeno. Las letras en cada columna representan diferencias significativas entre especies (^{a-c}), con base en la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). (Ríos *et al.*, 2019).

Es necesaria la evaluación de otras fuentes de biomasa para la obtención de biocombustibles, especialmente de aquellas que provienen de actividades agropecuarias y forestales, así como de la industria. En el caso de la agricultura, los cultivos energéticos generan subproductos útiles para la elaboración de biocombustibles. Pueden usarse también los esquilmos como paja de frijol y cereales, rastrojo de maíz y restos del procesamiento en la industria alimentaria. En el ámbito forestal se producen materiales lignocelulósicos a partir de especies de rotación de ciclo corto (short rotation coppice) y se usan los residuos del aprovechamiento forestal del bosque (ramas, hojas, trocería y aserrín).

Es necesario establecer laboratorios y capacitar personal para la evaluación de la calidad de la biomasa energética, con base en variables físicas, químicas y la combinación de atributos físico-químicos. Las características físicas de los biocombustibles son tamaño, forma, aspecto, densidad, humedad, friabilidad, resistencia a la compresión y absorción de gases. La composición química se evalúa mediante el estudio de elementos y compuestos; así como, con la determinación del poder calorífico superior de la biomasa. El estudio de las propiedades físico-químicas incluye la evaluación del coeficiente de conductividad térmica, combustibilidad, inflamabilidad, índice de calidad energética, temperatura máxima de la llama, potencia calorífica y densidad energética.

Se deben establecer las variables más importantes para la evaluación de la calidad de la biomasa usada como biocombustible, entre las que sobresalen el contenido de humedad, cenizas, volátiles totales y carbono fijo. Con base en dichas características físico-químicas, se determina la utilidad y aplicación real que se le puede dar a determinado tipo de biomasa (Forero *et al.*, 2012). Algunas especies vegetales producen cantidades altas de biomasa, pero ésta, tiene reducida calidad energética por su densidad baja. Una alternativa para mejorar este atributo es la densificación de la biomasa y el establecimiento del contenido de humedad apropiado para la elaboración de pélets. Lo anterior, con la finalidad de que los pélets cumplan con las propiedades de calidad requeridas por el mercado.

Se conoce como pélets a los comprimidos de biomasa utilizados para su combustión en calderas industriales y generación de energía calorífica para el hogar. Además, los

pélets pueden procesarse mediante torrefacción para incrementar su nivel calorífico y con ello, mejorar su calidad como combustible (Salazar *et al.*, 2015). La torrefacción es un proceso de pirólisis lenta e interrumpida que aumenta el valor calorífico de la biomasa y se caracteriza por las velocidades bajas de calentamiento, hasta alcanzar la temperatura de torrefacción (Bergman, 2005).

6. Importancia agrícola

La mayoría de los suelos agrícolas de Durango muestran contenido bajo de materia orgánica (< 1.5 %) (Rosales *et al.*, 2019), lo cual reduce la fertilidad y afecta negativamente el rendimiento de los cultivos energéticos. Lo anterior, se ha derivado de la falta de incorporación de los residuos de cosecha, estiércol y otros abonos orgánicos elaborados artesanalmente, como es el caso de la composta y Bocashi (Rosales *et al.*, 2018). El nivel bajo de materia orgánica agrava los problemas físico-químicos del suelo, reduce la captación de agua y disminuye la disponibilidad de nutrientes. Además, se dificulta la supervivencia de organismos benéficos del suelo, tales como bacterias del género *Rhizobium* y hongos micorrízicos, los cuales ayudan a las plantas en la obtención de agua y nutrientes.

La reducción del contenido de materia orgánica en el suelo ha incrementado la dependencia de la fertilización química, la cual es indispensable en la actualidad para aumentar el rendimiento. Se ha observado que el uso de fertilizantes químicos muestra efecto temporal positivo, tiene costo alto (especialmente los de liberación controlada) y contamina el ambiente. Por el contrario, la incorporación de materia orgánica fortalece la fertilidad en forma prolongada y mejora otras características del suelo como son: incremento de la infiltración y disponibilidad de agua, así como disminución de inundaciones, compactación, presencia de maleza y erosión. Además, se favorece la infiltración del agua y se incrementan las ganancias derivadas de la producción intensiva de biomasa energética.

7. Importancia ambiental

La importancia ambiental de la biomasa energética radica en el balance entre el carbono que fijan las plantas durante su crecimiento y el CO₂ (dióxido de carbono) que se genera durante la combustión, si se usa como biocombustible y de la descomposición (metano, CH₄) cuando se utiliza como abono orgánico. La combustión de las plantas, devuelve a la atmósfera el CO₂ fijado durante el crecimiento de los cultivos energéticos y por ello, se plantea que este sistema mantiene estable el balance de este gas de efecto invernadero. Lo anterior, difiere de lo que ocurre con los combustibles fósiles, los cuales devuelven a la atmósfera el CO₂ (Romero, 2010) que estaba almacenado en el subsuelo. La descomposición natural de los abonos orgánicos, también libera CO₂ y CH₄, lo cual incrementa la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

El análisis del manejo productivo de las plantas, usadas en la obtención de bioenergía, es importante para el cálculo preciso del balance de carbono y la cantidad de agua utilizada durante su cultivo. Con ello, se establece el costo energético y ambiental que tiene

la biomasa después de cultivarla, cortarla, recolectarla y transportarla con maquinaria que utiliza energía fósil. Además, es necesario acondicionar y compactar la biomasa (pélets y briquetas) en instalaciones industriales y distribuirla a gran distancia. Con todo ello, se incrementan los costos y emisiones de CO₂ generadas durante el proceso de elaboración de biocombustibles, por lo que la operación energética deja de ser considerada como renovable (Romero, 2010).

8. Fuentes de Biomasa

La biomasa es la forma más común de energía renovable y su uso está ampliamente difundido en las economías emergentes (McKendry, 2002). Se han realizado estudios para evaluar la producción de biomasa en diferentes especies vegetales, entre las que se incluyen pastos, maleza y arbustos desérticos y riparios (Evans, 2011). En los últimos años se ha incrementado el interés en la generación de energía dendro-térmica mediante la utilización de biomasa vegetal (Ranasinghe, 2014). En algunos países se han promovido las plantaciones comerciales con especies forestales que muestran nivel alto de supervivencia, regeneración fácil y crecimiento rápido.

Entre las plantas más populares para la producción de biomasa a nivel mundial se encuentran varias especies de eucalipto (*Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *E. denticulata*) (González-García *et al.*, 2013), sauce (*Salix* spp.), álamo (*Populus* spp.) y acacia (*Acacia dealbata*, *A. melanoxylon* y *A. retinodes*) (Ríos *et al.*, 2016). Estas especies producen cantidades altas de biomasa por unidad de superficie y pueden promoverse como plantas forestales de rotación corta (SRC) (Hoogwijk *et al.*, 2005). En Durango, se han establecido plantaciones de pino (*Pinus greggii*) (Álvarez *et al.*, 2018) que son utilizadas en la producción de biomasa, principalmente para uso industrial. Existen también múltiples especies vegetales de crecimiento rápido, con posibilidades de ser utilizadas como cultivos energéticos (Rosales *et al.*, 2018).

9. Especies

Entre las especies con posibilidades para la producción de biomasa en Durango, se pueden distinguir las adaptadas localmente y que muestran crecimiento rápido como son: álamo (*Populus* spp.), eucalipto (*Eucalyptus* spp.) y acacia (*Acacia retinoides*). Además, se deben estudiar especies ruderales, riparias y cultivadas como son: álamo blanco (*Populus alba*), jarilla de monte (*Dodonaea viscosa*), jarilla china (*Baccharis salicifolia*), maralfalfa (*Pennisetum* sp.), carrizo (*Arundo donax*), higuera (*Ricinus communis*), sauce (*Salix* spp.) y pino (*Pinus greggii*) (Rosales *et al.*, 2017). Entre dichas especies sobresalieron por supervivencia y productividad en Durango: acacia, álamo blanco, sauce, higuera y maralfalfa, las cuales son descritas brevemente a continuación.

Acacia (*Acacia retinoides*)

Especie originaria de Australia, es un árbol monoico de entre 7 m y 20 m de altura. Sus hojas son perennes, aunque en el norte de México la susceptibilidad a las temperaturas bajas (heladas) ocasiona la pérdida de éstas (CONAFOR, 2013) y el crecimiento arbustivo de la planta. El tallo tiene ritidoma de color grisáceo y sus hojas son filoides reducidos, de color verde claro, 3 a 20 cm de largo x 0.2 a 1.5 cm de ancho y una vena que corre a lo largo del filode. Las flores son de color amarillo pálido, distribuidas en cabezuelas de 0.5 a 0.8 cm de diámetro, las cuales pueden agruparse en racimos con un número de 6 a 15. Los frutos son vainas comprimidas de color café claro, casi lineares y semillas completamente rodeadas por un funículo de color rosa/escarlata (Invasoras. pt, 2017).

Álamo Blanco (*Populus alba*)

Es un árbol originario de Europa, Asia y norte de África. Es caducifolio, puede alcanzar una altura de 30 m, su tallo puede llegar a tener un metro de diámetro y muestra corteza y ramas blancas. La copa es amplia y redondeada, con ramas grandes, insertadas irregularmente y bifurcadas. Tiene hojas alternas y morfológicamente variables, con 3 a 5 lóbulos toscamente dentados, 6 a 12 cm de largo, simples, pecioladas, las adultas con haz glabro y envés densamente blanco-tomentoso, limbo polimorfo. Las hojas tienen un haz de color verde oscuro y son caducas, palmeadas, borde dentado y cubiertas del envés con una capa densa de pelos afieltrados de color blanquecino. Las flores masculinas son grandes, grises y estambres rojizos, 5 a 8 cm de longitud; mientras que, las femeninas son de un color gris-verdoso y 10 a 15 cm de longitud (Caudullo y de Rigo, 2016). El fruto es una cápsula ovoide y glabra. Las semillas tienen un penacho de pelos.

Sauce (*Salix* sp.)

Árbol endémico de México, llega hasta 15 m de altura y el diámetro normal medio es de 80 cm. Las hojas son perennes y ocasionalmente caducifolias, dependiendo de la disponibilidad de agua (CONAFOR, 2017). Hojas simples, alternas, linealmente-lanceoladas a oblongas, glabras, de 6 a 15 cm de largo por 1 a 3 cm de ancho, margen finamente aserrado; verdes en el haz, glaucas en el envés. Tronco con ramas abundantes, delgadas, ascendentes y glabras. La corteza es de color café oscuro a negruzco, rugosa y fisurada en bordes escamosos, aplanados e irregulares. Las inflorescencias son amentos masculinos axilares de 4 a 6 cm de largo, de flores densas; mientras que, los amentos femeninos son axilares de 2.5 a 6.5 cm de largo y las flores igualmente densas. Los frutos son cápsulas cortas de color pardo-amarillento a rojizo claro, de 6 mm de largo, sobre su pedicelo de 1 mm de largo; semillas numerosas con vello abundante. Las semillas tienen una longitud media de 1 mm, con un papo denso de pelos blancos (CONABIO, 2017a).

Higuerilla (*Ricinus communis*)

Es una especie herbácea y monoica originaria del norte de África y Asia, en donde se han encontrado poblaciones silvestres en Etiopia y la India (Jiménez *et al.*, 2016). Tiene tallo hueco, engrosado, ramificado y esta formado por una serie de nudos y entrenudos. La lámina de la hoja es casi orbicular, de 10 a 60 cm de diámetro, profundamente palmatilobulada, las divisiones ovado-oblongas a lanceoladas, agudas y acuminadas, borde irregularmente

dentado-glanduloso; pecíolo tanto o más largo que la lámina y posee glándulas entre lámina y pecíolo. Inflorescencia en panículas, con flores inferiores masculinas y superiores femeninas. Las flores masculinas con un perianto de 6 a 12 mm de largo, el de las flores femeninas de 4 a 8 mm de largo. El fruto es una cápsula sub-globosa, de 1.5 a 2.5 cm de largo, con espinas cortas y gruesas (equinado); semillas elipsoides, algo aplanadas, de 10 a 17 mm de largo, lisas, brillantes, frecuentemente jaspeadas de café-gris y conspicuamente carunculadas (Portillo *et al.*, 2017).

Maralfalfa (*Pennisetum sp.*)

Es una planta herbácea, perenne y robusta, originaria de África (CONABIO, 2017b). Sus hojas son alternas, venas paralelas y pueden dividirse en dos porciones: la vaina que envuelve el tallo y la parte superior llamada lámina, que es larga, angosta, plana y tiene vellos sedosos. Entre la vaina y la lámina, por la cara interna de la hoja, se presenta una pequeña prolongación membranosa de color café, llamada lígula (CONABIO, 2017b). El crecimiento de esta especie es rápido en Durango, por lo que en un ciclo de cultivo se pueden cosechar hasta 240 toneladas/ha de biomasa verde y 40 t/ha de materia seca (Jiménez *et al.*, 2014).

10. Adaptación en Durango

En etapas iniciales de la selección de especies con potencial para producción de biomasa energética se utilizaron variables no-destructivas, como son: supervivencia, altura de la planta y diámetro del tallo a la altura del cuello (DAC). Después, se evaluó la producción de biomasa a nivel de planta y por unidad de superficie, así como el contenido de fibras, poder calorífico, cenizas y compuestos volátiles totales (Salazar *et al.*, 2015; Rosales *et al.*, 2017). Las especies que mostraron niveles altos de supervivencia, adaptación y rendimiento de biomasa fueron seleccionadas para su uso como cultivos energéticos.

La maralfalfa e higuierilla, sobresalieron por su adaptación y mostraron productividad alta de biomasa en plantaciones comerciales establecidas en Durango (Rosales *et al.*, 2017). El rendimiento de maralfalfa, en Durango, alcanzó cerca de 240 t/ha de forraje verde y 40 t/ha de materia seca, el cual se obtuvo con el cultivo de rebrotes y un periodo de evaluación de 100 días después del riego inicial (Jiménez *et al.*, 2014). A nivel de planta, la producción total de biomasa fue alta en higuierilla, con 17.5 kg/planta, distribuidos en ramas (52 %), tallos (18 %), frutos (17 %) y hojas (14 %) (Rosales *et al.*, 2018).

Balance carbono/nitrógeno

El balance que se establece entre el carbono y nitrógeno es una de las características principales para establecer la calidad de la biomasa usada en la elaboración de abonos orgánicos. Con ello, se incrementa la posibilidad de producir composta y Bocashi con calidad nutricional alta para su uso como abono en cultivos energéticos. La elaboración de composta y Bocashi son los procesos más conocidos para el acondicionamiento de los residuos vegetales y la mineralización de los elementos contenidos en la materia

orgánica. Estos procesos consisten en la degradación de la biomasa vegetal, mediante el uso de microorganismos, hasta convertirla en un abono orgánico estable y con un balance carbono nitrógeno adecuado (25:1). La maralfalfa fue la especie que en un ciclo de cultivo se acercó más a este nivel del balance carbono: nitrógeno (23:1), por lo que puede utilizarse en la producción de abono orgánico (Ríos *et al.*, 2019).

Leña

La leña es un biocombustible sólido, que puede incinerarse directamente y representa uno de los principales usos energéticos de la biomasa (Bravo, 2008; REMBIO, 2011). Este combustible se ha utilizado desde la prehistoria (Álvarez, 2009), principalmente para la generación de energía calorífica. Las fuentes más comunes de leña en Durango son las especies vegetales del bosque templado (pino, encino) y las áreas de matorral xerófilo (mezquital), los cuales son actualmente ecosistemas con grado alto de perturbación (Ríos *et al.*, 2018a). Por ello, se buscan opciones para reducir la extracción innecesaria de biomasa, con la finalidad de revertir el daño ocasionado en los diferentes ecosistemas.

Pélets

Los pélets provienen de leña, residuos de la industria de la madera (aserrín), esquilmos de la producción agrícola y biomasa producida en plantaciones comerciales de especies de crecimiento rápido (REMBIO, 2011, Ríos *et al.*, 2018a). En la actualidad, se tiene tecnología para la densificación de la biomasa con la finalidad de incrementar su poder calorífico (Salazar *et al.*, 2016; Ríos *et al.*, 2018a). Para lograrlo, es necesario contar con biomasa suficiente y con la calidad requerida para producir pélets que cumplan con las normas internacionales para este biocombustible (Ríos *et al.*, 2018a).

Carbón Vegetal

Es el biocombustible elaborado con madera de diferentes especies vegetales, la cual es obtenida en sitios con cambio en el uso del suelo, rodales con manejo de la regeneración de árboles, bosques naturales y plantaciones forestales (REMBIO, 2011). La elaboración del carbón vegetal incluye la pirólisis controlada que genera un combustible de peso menor y contenido energético mayor, con respecto a la madera utilizada como materia prima (REMBIO, 2011). Se debe considerar que las diferencias entre especies vegetales y edad de corte de los árboles, usados para la producción de carbón, ocasionan variaciones en la calidad del producto. Lo anterior, debido principalmente a la diferencia en la densidad de la madera que se utiliza en su elaboración, lo cual influye también en el poder calorífico superior del producto obtenido (Ríos *et al.*, 2018b).

11. Avances

En México se inició la evaluación de especies, endémicas e introducidas, para seleccionar las que muestren eficiencia en la producción de biomasa (Salazar *et al.*, 2015, Rosales *et al.*, 2018). La biomasa obtenida puede ser utilizada en la producción de biocombustibles sólidos, como pélets, briquetas y pélets torrefactados con poder calorífico

alto. Además, los residuos pueden utilizarse en la elaboración de abonos orgánicos, como composta y Bocashi. Se determinó que la maralfalfa (*Pennisetum* sp.) es una especie introducida que tiene potencial para producir 40 t de biomasa seca en un periodo de tres meses (Jiménez *et al.*, 2014; Rosales *et al.*, 2018). Otras especies sobresalientes por la productividad de biomasa fueron higuierilla, acacia, álamo blanco y sauce (Rosales *et al.*, 2018). La productividad alta de biomasa en maralfalfa puede aprovecharse en la elaboración de biocombustibles líquidos (etanol), sólidos (pélets y pélets torrefactados) y abonos agrícolas.

Se considera que la disponibilidad de fuentes sostenibles de biomasa, por medio de cultivos energéticos, así como la incorporación constante materia orgánica a los suelos contribuirán al incremento de la competitividad de la producción agropecuaria y forestal en México. Con ello, aumentará la producción de alimentos, se generarán mayores beneficios económicos y aumentará el nivel de vida de la población. Además, se contribuirá a la generación de energía sostenible, conservación ambiental y al incremento del ingreso del productor en áreas marginales.

12. Generación de Opciones Tecnológicas

Se identificaron diferentes componentes tecnológicos que pueden ser de utilidad en la producción eficiente de biomasa en cultivos energéticos. Los componentes principales se describen a continuación:

Especies

Se seleccionaron cinco especies energéticas de crecimiento rápido, las cuales son de tipo herbáceo: (higuierilla y maralfalfa), arbustivo-arbóreo (acacia) y arbóreo (álamo blanco y sauce).

Propagación

La higuierilla y acacia se propagan por medio de semilla y ésta última se germina en charolas de poliestireno expandido de 77 cavidades. Para ello, se utiliza sustrato reutilizable preparado a base de suelo, turba y vermiculita en la proporción (50:25:25). Las charolas se riegan regularmente y cuando el proceso de germinación-emergencia se hace durante el invierno, se envuelven en películas de polietileno y se colocan en invernadero hasta la emergencia de las plántulas de acacia. Después, se descubren las plántulas emergidas y se les proporciona riego regular hasta que alcanzan 10 cm de altura, que es cuando están listas para su transferencia a macetas de polietileno tubular, con 5 kg de capacidad. En el caso de higuierilla, las semillas se siembran directamente en la maceta, aunque es necesario considerar que esta especie muestra dificultades para su germinación y emergencia, aún en condiciones controladas. Por ello, se deben sembrar 4 a 5 semillas para asegurar la germinación-emergencia y después aclarear, para dejar una planta por maceta.

Las especies propagadas vegetativamente son maralfalfa, álamo blanco y sauce. En la reproducción vegetativa se utilizan rizomas (maralfalfa) y brotes tiernos con raíz (álamo

blanco y sauce). En condiciones de vivero se utilizan macetas de 5 kg de capacidad, llenadas con 4 kg de sustrato reutilizable, el cual se prepara con suelo, turba y vermiculita en la proporción (50:25:25). El vivero se establece en febrero y se aplica riego en forma regular (cada cuatro días) para evitar el estrés de humedad en las plantas en crecimiento. Las plantas de la mayoría de las especies estarán listas para su trasplante en junio.

Sitios de Plantación

El sitio puede tener una altitud de 1880 m, con suelos predominante francos (arenosos y arcillosos), los cuales tienen capacidad intermedia para la retención de humedad, profundidad media, pendiente de 0 a 2 %, pH de 7.9 y en general, muestran niveles bajos de contenido de materia orgánica, fósforo y nitrógeno. La tecnología se recomienda principalmente para clima templado semiárido [BS₁ kw (w) (e)], con régimen de lluvias en verano, variación fuerte de temperatura, con una media anual de 17.1 °C (García, 1987). En los sitios de plantación, la lluvia acumulada durante el año debe alcanzar un promedio de 476 mm, con valores altos entre junio y septiembre (Medina et al., 2005).

Manejo Agronómico

La plantación se realiza preferentemente en junio, lo cual corresponde con el inicio del periodo de lluvias del ciclo primavera-verano. Se recomienda utilizar densidades altas de plantación con hilera doble (8902 plantas/ha). En dicho sistema se utiliza la distancia entre hileras de 3 m y entre plantas 0.60 m, así como 0.75 m entre la doble hilera de plantas. La preparación del suelo, previa al establecimiento de especies energéticas en campo, consiste en un subsuelo cruzado, un paso de rastra, surcado, riego (en periodo de estiaje) y un segundo paso de rastra. Después, se efectúa el trazo de la plantación y se inicia el trasplante en hoyos que se realizan hasta dejar la anchura adecuada para introducir el cepellón completo. Después, se cubre el cepellón con tierra y se apisona el suelo para asegurar el trasplante correcto de las plantas.

Se instala el sistema de riego presurizado por goteo con cintilla de 16 mm, dispersores cada 20 cm (comercial) o ajustados a 60 cm (cintilla sin goteros de fábrica) y con un gasto de 1 a 2 L/h. Se fertiliza 35 días después del trasplante (DDT), mediante la incorporación de fertilizante granulado con la dosis 35-50-00 para nitrógeno (N), fósforo (P₂O₅) y potasio (K₂O). El control de la maleza se realiza mediante tres pasos de rastra por los callejones y tres deshierbes manuales realizados con azadón. Se aplica insecticida (dimetoato: Danapyr® o spinetoram: Palgus®) para el control de insectos plaga como diabrotica (*Diabrotica* spp.), catarina negra (posiblemente *Gastrophysa polygoni*; Coleoptera:Chrysomelidae) y gusano elotero [*Helicoverpa* (= *Heliothis*) *zea*].

Algunos años, se observa la incidencia de otros insectos plaga, como es el caso de frailecillo naranja (posiblemente *Neolema sexpunctata* y *Badister neopulchellus*; Coleoptera:Chrysomelidae). Se ha demostrado que las especies energéticas son hospederos de múltiples especies de insectos, algunos benéficos y otros considerados como plaga (Santana et al., 2019). A continuación se muestran las familias que utilizan como hospedero a las especies energéticas durante la estación de invierno, en Durango, México.

Órdenes y familias de insectos

En la plantación de especies energéticas se observaron seis órdenes de insectos (Tabla 2), entre los cuales predominó Diptera (15 familias), seguido de Hymenoptera (9), Hemiptera (9) y Coleoptera (8). En contraste, los órdenes con el número más bajo de familias fueron Dermaptera (1) y Lepidoptera (2). La familia Chloropidae (Diptera) predominó en todas las especies vegetales (5) y mostró un número alto para el total de individuos (306), con nivel alto de especificidad en el cultivo de maralfalfa. En otros estudios se ha demostrado la relación entre este tipo de insectos y especies vegetales de la familia Poaceae y Brassicaceae (Parra *et al.*, 2013; Kalaisekar *et al.*, 2017).

El álamo blanco fue la especie que atrajo una cantidad mayor de familias de insectos (28) y fue seguida por las poblaciones de acacia y sauce con 22 familias, cada una. En álamo blanco y sauce, la presencia de hojas verdes favoreció la insidencia de los insectos que buscaron fuentes de alimentación (Cranshaw *et al.*, 1994), mientras que acacia y maralfalfa fueron utilizadas preferentemente para resguardo de las temperaturas bajas, humedad relativa y radiación solar incidente durante el día (Abidin *et al.*, 2013). Lo anterior, debido a que dichas especies mostraron tallos secos y ramas con múltiples hojas secas, adheridas y dobladas hacia abajo, lo que proporcionó protección a los insectos. Los niveles más bajos para el número de familias de insectos se observaron en lotes de higuera (14), debido a la presencia de múltiples compuestos tóxicos y repelentes en las plantas de esta especie (Salem *et al.*, 2017).

Las especies que mostraron población alta de individuos para diferentes familias de insectos fueron maralfalfa (253) y sauce (158); mientras que el número más bajo se registró en higuera (49). Lo anterior, se debió a la preferencia de algunas familias de insectos por gramíneas y acumulación de hojas secas en maralfalfa; así como los repelentes contenidos en la planta de higuera.

Tabla 2. Orden, familias y número de insectos capturados en cultivo energéticos.

Orden	Familia	AC ¹	HI	AB	SA	MA	Total
Coleoptera	Carabidae	4	1	5	1	2	13*
Coleoptera	Chrysomelidae	1	0	4	5	2	12
Coleoptera	Coccinellidae	1	0	2	0	1	4
Coleoptera	Curculionidae	1	0	1	3	0	5
Coleoptera	Elateridae	0	0	1	0	0	1
Coleoptera	Melyridae	0	1	0	1	0	2
Coleoptera	Scarabaeidae	0	1	0	0	0	1
Coleoptera	Tenebrionidae	0	0	0	0	1	1
Dermaptera	Labiduridae	2	8	6	0	2	18
Diptera	Agromyzidae	0	0	2	7	5	14
Diptera	Bombilidae	0	0	0	0	1	1
Diptera	Calliphoridae	0	0	0	0	1	1

Table 2. Continúa en la siguiente página.

Producción alta y sostenible de bioenergía mediante el uso de especies vegetales de crecimiento rápido
Ríos Saucedo et al.

Tabla 2. Continúa de la página anterior.

Orden	Familia	AC ¹	HI	AB	SA	MA	Total
Diptera	Cecidomyiidae	0	0	0	1	0	1
Diptera	Chloropidae	30	12	26	63	175	306
Diptera	Syrphidae	0	3	4	0	0	7
Diptera	Culicidae	0	1	0	2	8	11
Diptera	Dolichopodidae	0	0	0	4	0	4
Diptera	Drosophilidae	0	1	0	0	0	1
Diptera	Muscidae	11	3	10	3	1	28
Diptera	Mycetophilidae	1	0	0	0	0	1
Diptera	Sciaridae	13	0	1	0	3	17
Diptera	Syrphidae	5	0	0	1	0	6
Diptera	Tephritidae	0	1	5	6	23	35
Diptera	Tipulidae	0	0	1	0	0	1
Hemiptera	Anthocoridae	5	0	3	0	0	8
Hemiptera	Aphididae	0	2	1	1	0	4
Hemiptera	Cicadellidae	12	3	12	20	1	48
Hemiptera	Cicadidae	9	0	4	7	4	24
Hemiptera	Lygaeidae	0	0	4	2	0	6
Hemiptera	Membracidae	1	0	1	1	0	3
Hemiptera	Miridae	6	8	11	9	11	45
Hemiptera	Pentatomidae	0	4	4	3	2	13
Hemiptera	Reduviidae	0	0	1	0	1	2
Hymenoptera	Braconidae	3	0	2	8	5	18
Hymenoptera	Eucharitidae	0	0	1	0	0	1
Hymenoptera	Eulophidae	0	0	2	2	0	4
Hymenoptera	Formicidae	4	0	1	8	4	17
Hymenoptera	Pompilidae	0	0	1	0	0	1
Hymenoptera	Scelionidae	1	0	0	0	0	1
Hymenoptera	SI	1	0	0	0	0	1
Hymenoptera	Sphecidae	0	0	1	0	0	1
Hymenoptera	Vespidae	2	0	0	0	0	2
Lepidoptera	Gelechiidae	1	0	0	0	0	1
Lepidoptera	Nymphalidae	1	0	0	0	0	1
	Total	115	49	117	158	253	692
	Familias	22	14	28	22	20	44

¹AC= Acacia, HI = Higuera, AB = Álamo Blanco, SA = Sauce, MA = maralfalfa.

Se determinó que en la estación invernal predominaron las familias de dípteros, las cuales revisten interés especial desde el punto de vista económico por su importancia agrícola, veterinaria y médica. Los otros órdenes (Hymenoptera, Hemiptera y Coleoptera) mostraron respuesta variable debido principalmente a los hábitos de consumo de los insectos, parámetros climáticos (Yilangai *et al.*, 2015) y estado fenológico de las plantas. Las variaciones en la morfología y fenología de las plantas favorecieron el mantenimiento de la diversidad de insectos, a pesar de las temperaturas bajas registradas durante el invierno. La ampliación del número de especies vegetales cultivadas, en un sitio determinado, favorece la diversificación de las comunidades de insectos y el incremento del número de individuos en aquellas que se adaptan localmente.

Productividad del Agua

Es recomendable la aplicación de ocho riegos de auxilio con el uso de cintilla, además de la lluvia acumulada, para contribuir a la sostenibilidad productiva, asegurar la supervivencia y evitar el estrés hídrico en las plantas de todas las especies incluidas en la plantación. Con ello, se logra una expresión alta del potencial genético para la producción de biomasa en cada una de las especies energéticas. Los riegos pueden ser ligeros, con una duración de 4 h y un gasto por gotero de 1 L/h. Durante la estación de crecimiento, abril a octubre, la lámina de riego acumulada (L_{RA}) debe superar los 86 L/m² en el caso de plantaciones a hilera doble.

En 2018, se observó que la L_{RA} fue 529.3 mm (444 mm de lluvia + 85.3 mm de riego); mientras que, en 2019 se registró un valor acumulado de 344.6 mm (259.3 mm de lluvia + 85.3 mm de riego). En 2018, la productividad del agua fluctuó entre 3.3 kg/ha/mm (álamo blanco) y 27.3 kg/ha/mm (maralfalfa); mientras que en 2019 se obtuvieron valores entre 6.9 kg/ha/mm (sauce) y 40.0 kg/ha/mm (maralfalfa) (Tabla 3). Pudo concluirse, que la productividad del agua fue determinada principalmente por la especie, fecha de aplicación del riego, distribución de la precipitación pluvial y etapa fenológica del cultivo energético.

Tabla 3. Rendimiento de biomasa seca y productividad del agua en diferentes cultivos energéticos en dos ciclos de evaluación.

Especie	Biomasa Seca kg/ha		Productividad del agua kg/ha/mm	
	2018	2019	2018	2019
Higuerilla	4774	6253	9.0	18.1
Álamo Blanco	1761	3249	3.3	9.4
Sauce	1810	2389	3.4	6.9
Acacia	3269	6450	6.2	18.7
Maralfalfa	14461	13796	27.3	40.0
Promedio	5215	6427	9.8	19.0

El rendimiento alto de biomasa y capacidad alta de rebrote, observados en maralfalfa, favorecieron los niveles altos de productividad del agua en esta especie. Lo anterior, demuestra la capacidad de esta especie para aprovechar los recursos del medio, especialmente cuando se dosifica el suministro de agua. Otras especies sobresalientes fueron higuierilla y acacia, las cuales mostraron niveles intermedios para la productividad del agua, la cual es reconocida como una variable importante en sitios con niveles bajos de disponibilidad de riego. El crecimiento perenne de las especies favoreció la productividad del agua, especialmente durante el cultivo de rebrotos, durante el segundo año de la plantación.

Variables Morfo-fisiológicas

Durante el ciclo primavera-verano, se pueden evaluar mensualmente variables morfológicas para determinar el crecimiento de las plantas en cada una de las especies energéticas. Entre dichas variables se puede mencionar: altura de la planta y los diámetros de copa, basal del tallo (DAC) y macollo (maralfalfa). En octubre se determina el rendimiento de biomasa seca, para lo cual, se cortan muestras de 6 m lineales en cinco puntos de la plantación (cinco de oros) a hilera doble (22.5 m²). En campo se obtiene el peso fresco y luego se obtiene una sub-muestra de plantas completas de peso conocido, las cuales se pican, se colocan en bolsas y se introducen en bolsas de papel a una estufa de aire forzado para obtener el peso seco. La biomasa fresca, obtenida en la muestra inicial, se ajusta con base en la proporción media de materia seca, la cual se determina a nivel de sub-muestra. El uso de variables morfológicas y fisiológicas (rendimiento), fueron suficientes para la selección inicial de especies con posibilidades de uso como cultivos energéticos.

Condiciones Agroclimáticas

Es necesario determinar, el valor para la lluvia acumulada durante el ciclo de cultivo, principalmente entre los meses de junio y octubre. Además, de registrar la precipitación se puede evaluar la humedad del suelo y con ello, estar en posibilidades de aplicar riego oportunamente. Cuando la distribución de la lluvia es irregular se hace necesaria la aplicación de hasta ocho riegos de auxilio, para evitar estrés de humedad en las plantas durante la etapa vegetativa y en el periodo reproductivo (higuierilla). Otra variable importante, es la temperatura (máxima y mínima), ya que cuando estas son altas se incrementa la demanda ambiental y el requerimiento hídrico, así como la incidencia de patógenos e insectos plaga. Lo anterior, influye directamente sobre el rendimiento de biomasa obtenido con las diferentes especies.

La temperatura máxima muestra valores altos los primeros días después de la plantación en 2018 (31.6 °C) (Figura 1) y el rebrote en 2019 (33.0 °C). Después, se observan fluctuaciones entre 24.0 °C y 33.0 °C. Las condiciones meteorológicas registradas en el ciclo primavera-verano en Durango, hacen necesaria la aplicación de riego. Lo anterior, con la finalidad de obtener niveles máximos de expresión del potencial genético para el rendimiento de biomasa en cultivos energéticos. También, se observa efecto de la temperatura sobre el crecimiento y desarrollo de algunas especies; así como en la incidencia organismos patógenos e insectos plaga.

Se ha observado descenso en la temperatura mínima a finales de septiembre, como fue el caso de Durango en 2018 (9.8 °C) y 2019 (11.9 °C) (Figuras 1 y 2). Dichas temperaturas, se combinan ocasionalmente (2018) con las lluvias abundantes registradas en septiembre (75.2 mm) y octubre (64.0 mm), lo cual favorecieron el incremento en la altura de las plantas antes del corte. También, se observa efecto negativo de las temperaturas en el crecimiento y

desarrollo, lo cual afecta drásticamente a las plantas cuando la temperatura mínima desciende a 0 °C (heladas), especialmente en maralfalfa, higuera y acacia. En el caso de especies perennes es necesario aplicar riego en los meses de abril y mayo, para reactivar el crecimiento, cuando se cultivan rebrotes. Con ello, se obtienen niveles máximos de expresión del potencial genético para el rendimiento de biomasa en las especies energéticas.

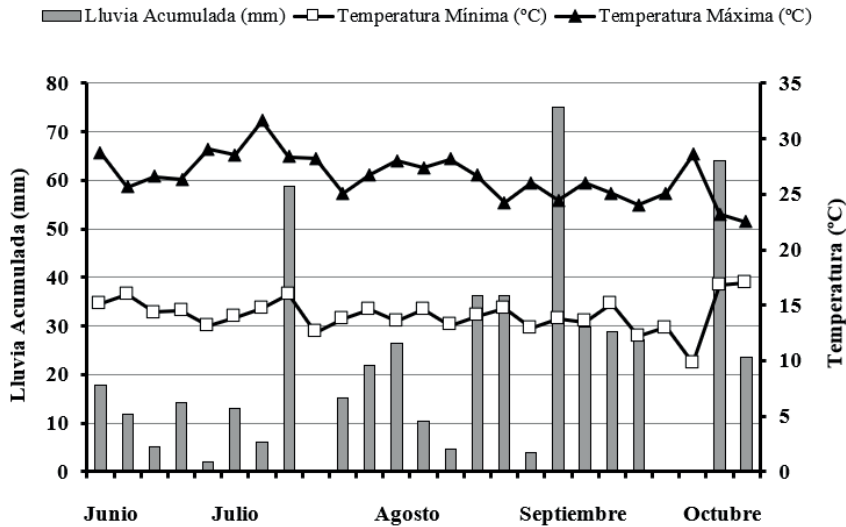


Figura 1. Lluvia acumulada y promedios de temperatura máxima y mínima en periodos de cinco días. Estación Agrometeorológica Durango (CEVAG y CONAGUA, 2018).

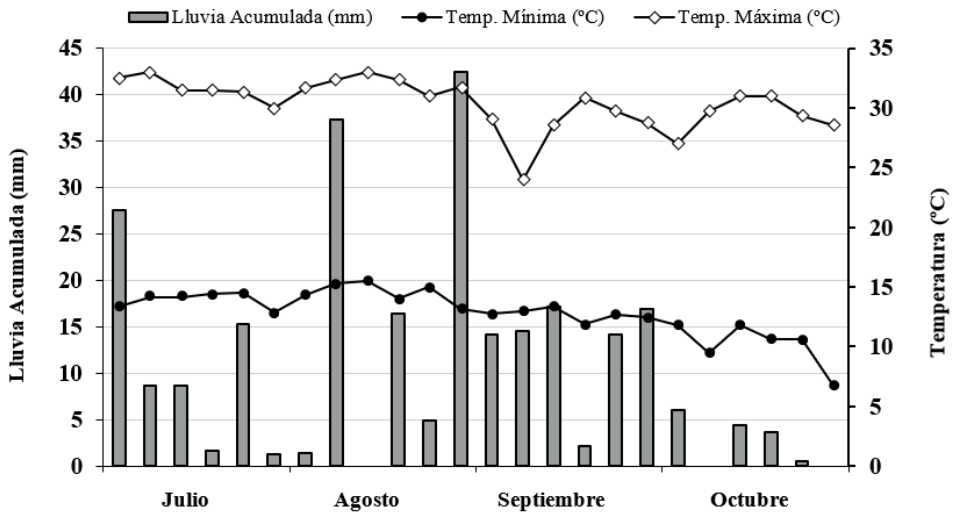


Figura 2. Lluvia acumulada y promedios de temperatura máxima y mínima en periodos de cinco días. Estación Agrometeorológica Durango (INIFAP, 2019).

Variables Morfológicas

En cada ciclo de cultivo, la maralfalfa ha mostrado valores superiores para la altura de la planta en hilera doble (360 cm), con variación baja entre densidades (Figura 3). En contraste, las especies arbóreas, especialmente sauce, mostraron altura inferior de la planta durante el primer ciclo de crecimiento con 132 cm. Lo anterior, a pesar de mostrar altura de planta similar durante el trasplante con respecto a otras especies como higuierilla y acacia, las cuales presentaron altura mayor al término del ciclo de crecimiento (126 Días Después del Trasplante; DDT). En higuierilla, la altura de la planta fue menor por efecto de la densidad de población (231 cm), debido a la variación en la altura inicial y sombreado de las plantas más pequeñas.

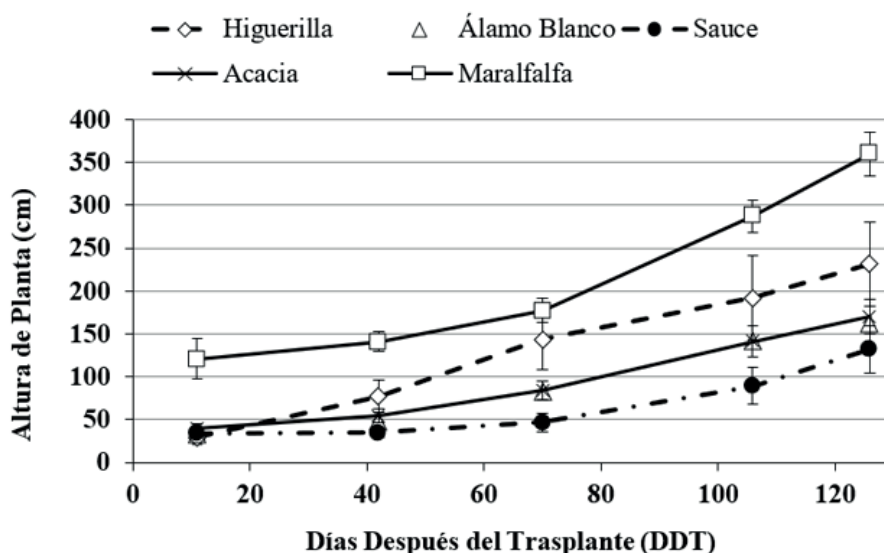


Figura 3. Incremento de altura de la planta en especies energéticas cultivadas en hilera doble. Durango, 2018.

El diámetro mayor del tallo a la altura del cuello (DAC) se alcanzó en higuierilla a hilera doble, con 35 mm a los 106 DDT (Figura 4). Se observó que en densidades altas de población los valores para el diámetro del tallo fueron inferiores, debido a la competencia ejercida entre plantas. En higuierilla, se ha observado que la densidad baja de población favorece el engrosamiento del tallo (Oliveira *et al.*, 2017). La maralfalfa mostró otro tipo de respuesta alcanzando el valor máximo 20 mm, a los 70 DDT y luego mantuvo el DAC en las fechas posteriores de evaluación. Aunque en esta especie se observó igualdad en el DAC de los tallos, se incrementó el diámetro del macollo alcanzando 21.4 cm en hilera doble. Las especies arbustivas (acacia) y arbóreas (sauce y álamo blanco) mostraron valores bajos del DAC, durante el primer ciclo de crecimiento.

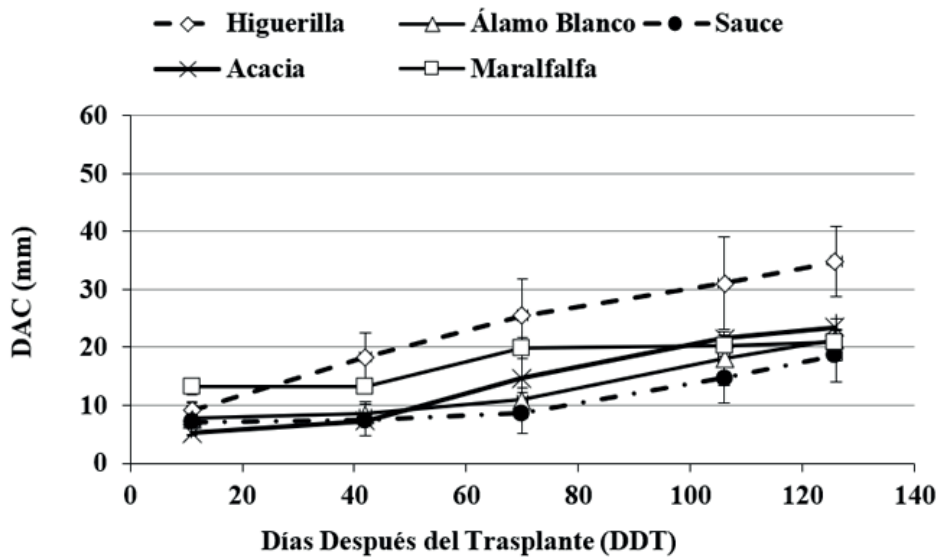


Figura 4. Incremento del diámetro del tallo a la altura del cuello (DAC) en especies cultivadas para la producción de biomasa en hilera doble. Durango, 2018.

El diámetro de copa fue mayor en álamo blanco (131 cm), higuerrilla (123 cm) y acacia (114 cm), especies en las que se registró incremento constante del diámetro de copa, hasta los 106 DDT (Figura 5). Después, los valores del diámetro de copa fueron similares entre las dos últimas fechas de muestreo. En las especies herbáceas, de crecimiento rápido (higuerrilla), se observó efecto de competencia entre plantas por el diámetro amplio de la copa. En contraste, en las especies arbóreas (sauce y álamo blanco), se registró incremento constante para esta variable, debido al menor nivel de crecimiento y ramificación inicial. En maralfalfa el diámetro basal de la copa mostró crecimiento reducido debido a la morfología de la planta, que muestra tallos erectos, sin ramificación en la parte aérea.

Se comprobó que las variables morfológicas, especialmente altura de la planta y DAC, pueden utilizarse como criterios para la selección inicial de especies vegetales de crecimiento rápido que muestren adaptación en un sitio determinado. La selección se podrá realizar en diferentes sistemas de manejo que optimicen el crecimiento, sin descuidar el uso eficiente de los recursos y la sostenibilidad de la producción.

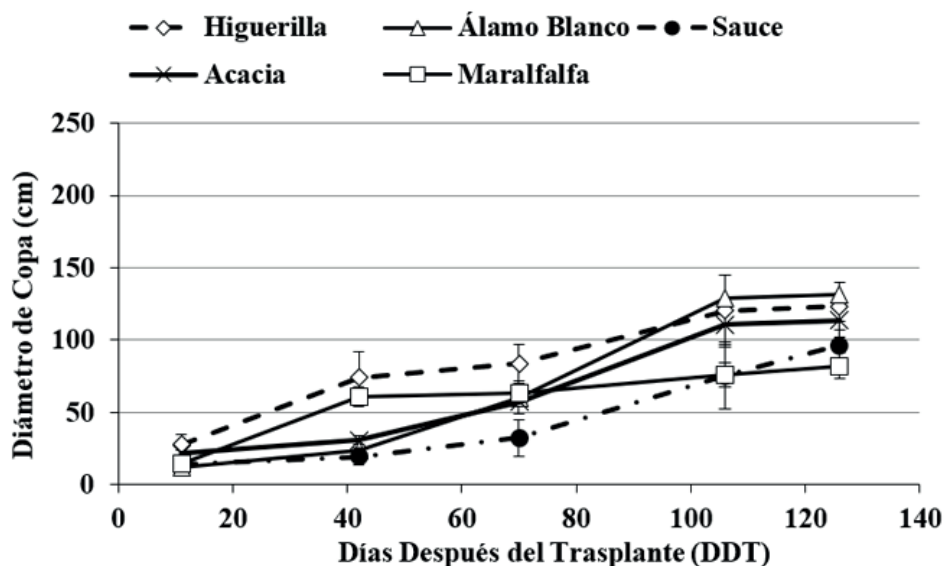


Figura 5. Incremento del diámetro de copa en especies cultivadas para la producción de biomasa en hilera doble. Durango, 2018.

13. Rendimiento de Biomasa

Se observaron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$), entre densidades y especies, para el rendimiento de biomasa fresca y seca (Tabla 4). En el primer ciclo de cultivo (P-V 2018), la especie con rendimiento significativamente superior de biomasa fue maralfalfa con 81496 kg/ha de biomasa fresca y 14461 kg/ha de biomasa seca (Tabla 4). En contraste, las especies arbóreas mostraron los rendimientos de biomasa fresca y seca significativamente inferiores. Los resultados demostraron la eficiencia para la producción de biomasa en las gramíneas y algunas dicotiledóneas, como higuierilla. Dichas especies, como maralfalfa e higuierilla, pueden utilizarse en la producción de biomasa útil para generación de bioenergía.

La maralfalfa es una opción productiva, como cultivo energético, para la obtención de cantidades altas de biomasa, fresca y seca, en el corto plazo (126 días). Otras opciones productivas son higuierilla y acacia, aunque la producción de biomasa es inferior. En el caso de las especies arbóreas mostraron nivel bajo de producción de biomasa, pero se consideró que es posible que dicha situación cambie en el largo plazo. Lo anterior, debido a la posibilidad de continuar su crecimiento durante la época seca y fría del año, en la cual se observó daño completo por helada en maralfalfa, higuierilla y acacia.

Tabla 4. Rendimiento de biomasa fresca y seca en diferentes especies cultivadas en dos ciclos de cultivo.

Especie	Biomasa Fresca kg/ha		Biomasa Seca kg/ha	
	2018	2019	2018	2019
Higuerilla	24106 ^b	46517	4774 ^b	8327
Alamo Blanco	5296 ^c	14513	1761 ^d	4194
Sauce	5882 ^c	7026	1810 ^d	2141
Acacia	10618 ^c	15537	3269 ^c	4832
Maralfalfa	81496 ^a	46642	14461 ^a	11427
Promedio	25480	26047	5215	6184

Las letras en cada columna representan diferencias significativas entre especies (^{a-c}), con base en la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Persistencia

La maralfalfa mostró nivel alto de persistencia durante el cultivo de rebrotes, realizado en el segundo ciclo de corte (P-V 2019) (Tabla 5). En dicha especie, el 100 % de las plantas rebrotaron en las dos fechas de evaluación y crecieron normalmente, por lo que superó al resto de los cultivos energéticos. Otras especies que sobresalieron fue el álamo blanco y la acacia; mientras que, la higuerilla presentó nivel bajo de persistencia, por lo que es necesaria su siembra o plantación en cada ciclo de cultivo.

Tabla 5. Supervivencia y persistencia de especies energéticas en dos fechas de evaluación. Durango, México. 2019.

Especie	Primavera	Primavera-Verano
Higuerilla	6.7±2	7.5±3
Álamo Blanco	65.4±7	75.8±8
Sauce	63.8±6	60.8±6
Acacia	49.9±9	55.0±12
Maralfalfa	100.0±0	100.0±0
Promedio	57.2	59.8

14. Uso Energético

Se observaron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$), entre especies, para las variables relacionadas la calidad de la biomasa utilizada en la generación de energía (Tabla 6). La maralfalfa, mostró el valor más alto para FDN (79.5 %), mientras que el contenido de FDA fue alto en acacia (58.0 %). La medición de FDN y FDA se asocia indirectamente con la cantidad de energía contenida en la biomasa lignocelulósica, por lo que estas variables pueden utilizarse en la selección de especies con potencial energético alto (Godin *et al.*, 2010). Con base en lo anterior, se puede decir que acacia y maralfalfa mostraron facilidad para producir biomasa con calidad durante la generación de energía, debido a que

el contenido de fibras se relaciona con el contenido alto de celulosa, hemicelulosa y lignina (Godin *et al.*, 2010; Möller, 2014). La maralfalfa mostró contenido alto de hemicelulosa 22.3 % y celulosa (41.0 %), debido principalmente a la selección realizada en esta especie para conseguir plantas útiles en la alimentación animal. Se observó que las especies arbustivas-arbóreas, especialmente álamo blanco y acacia, incrementaron el contenido de celulosa en relación con el contenido de hemicelulosa. En el caso de maralfalfa, se observó una proporción alta de ambos compuestos.

Tabla 6. Atributos de calidad de la biomasa obtenida en diferentes cultivos energéticos.

Especie	¹ FDN (%)	FDA (%)	HEM (%)	CEL (%)	LIG (%)	PCS (mJ/kg)
Sauce	62.0 ^{cb}	49.3 ^b	8.9 ^c	33.1 ^{bc}	20.1 ^a	20.1 ^a
Alamo Blanco	68.3 ^b	54.4 ^{ab}	10.1 ^{bc}	38.4 ^{abc}	19.7 ^a	19.2 ^{ab}
Higuerilla	52.5 ^c	38.4 ^c	11.2 ^{bc}	29.2 ^c	12.0 ^b	19.4 ^{ab}
Acacia	74.5 ^a	58.0 ^a	11.7 ^b	38.8 ^a	24.0 ^a	19.0 ^b
Maralfalfa	79.5 ^a	53.1 ^{ab}	22.3 ^a	41.0 ^{ab}	16.2 ^b	16.6 ^c
Promedio	67.4	50.6	12.8	36.1	18.4	18.8

¹FDN = fibra en detergente neutro, FDA = fibra en detergente ácido, HEM = hemicelulosa, CEL = celulosa, LIG = lignina y PCS = poder calorífico superior. Las letras en cada columna representan diferencias significativas entre especies (***) con base en la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Las dos especies herbáceas (higuerilla y maralfalfa) mostraron niveles significativamente inferiores de lignina con valores entre 12.0 y 16.2 %; mientras que, el resto de los cultivos energéticos presentaron variaciones entre 18.9 % a 25.8 %. Los resultados son similares a los mostrados en otros estudios en los que se observaron diferencias en el tipo y niveles de lignina entre especies, especialmente en el caso de bagazo de caña comparado con maderas suaves y duras (Zhang *et al.*, 2013). Se ha observado también que los tipos y cantidad de lignina difirieron entre especies, tejidos y tipo de células, lo cual es afectado por el desarrollo de la planta y el estrés biótico y abiótico (Yoon *et al.*, 2015). Se ha demostrado que los niveles altos para el contenido de lignina favorecen el incremento del poder calorífico superior (Santos *et al.*, 2015).

La maralfalfa mostró los valores más bajos de PCS con 16.6 mJ/kg y esta especie fue seguida por acacia, con 19.0 mJ/kg; mientras que, el resto de las especies presentaron valores estadísticamente superiores entre 19.2 mJ/kg y 20.1 mJ/kg. Los resultados fueron similares a los reportados en estudios previos con gramíneas (*Pennisetum* spp.), en los que se han observado valores del PCS entre 16.9 y 17.6 mJ/kg (Santos *et al.*, 2015). En el caso de estudios con especies arbóreas, se registraron valores para el poder calorífico superior entre 17.6 y 20.8 mJ/kg (Telmo y Lousada, 2011; Santos *et al.*, 2015). Los resultados mostraron que la biomasa de maralfalfa puede utilizarse en la producción de biocombustibles sólidos, mediante su densificación en péllets simples y torrefactados (Salazar *et al.*, 2015; Ríos *et al.*, 2018a). Además, se puede usar en la sacarificación de la biomasa para la elaboración de bioetanol (Souza *et al.*, 2015). El resto de las especies han sido utilizadas exitosamente en la elaboración de biocombustibles sólidos, especialmente péllets.

15. Calidad de pélets

En la evaluación de la calidad de pélets de maralfalfa se determinó que el contenido humedad fue inferior en los pélets de maralfalfa (6.5 %), en relación con el testigo comercial de pino (7.2 %) (Tabla 7) y ambos resultaron altos al compararlos con los valores obtenidos en pélets de pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) 3.2 % (Wibowo *et al.*, 2017). La proporción de cenizas fue inferior en los pélets de maralfalfa (3.1 %), en relación con el testigo comercial de pino (3.5 %). En ambos casos, la proporción de cenizas fue inferior al registrado en otros estudios con pasto elefante, en los cuales se obtuvo un valor de 17.5 % (Wibowo *et al.*, 2017). La proporción de compuestos volátiles totales fue inferior en los pélets de maralfalfa (77.3 %), en relación con los obtenidos en pino (91.9 %) y ambos resultaron superiores a los niveles registrados en otras investigaciones con pasto elefante, en los cuales se obtuvo 26.9 % de material volátil.

El carbón fijo fue alto (19.6 %) en los pélets de maralfalfa, en relación con el valor obtenido en el caso de pino (4.6 %). Los valores de carbón fijo fueron bajos en las dos especies evaluadas en comparación con los obtenidos en otras investigaciones, en las cuales se registró un nivel de 55.6 % (Wibowo *et al.*, 2017). El poder calorífico de los pélets de maralfalfa fue inferior (16.6 MJ kg⁻¹), en relación con el valor registrado en pino (19.5 MJ kg⁻¹). Los valores obtenidos se situaron en el intervalo obtenido en otros estudios con *Pennisetum* en los que se obtuvo un valor calorífico entre 15.2 y 22.9 MJ kg⁻¹ (5468.63 kcal kg⁻¹) (Quintero *et al.*, 2014; Wibowo *et al.*, 2017). Es necesario ajustar el proceso de elaboración de pélets de maralfalfa, para cumplir con la norma Ö-norma M7135 que muestra como valor mínimo 18 MJ kg⁻¹ (Atuesta y Sierra, 2015).

Tabla 7. Valores promedio observados para variables evaluadas en el análisis inmediato de pélets de maralfalfa y pino.

Pélet	Humedad (%)	Cenizas (%)	Volátiles (%)	Carbón Fijo (%)	¹ PCS (MJ kg ⁻¹)
Maralfalfa (n=9)	6.5±0.14	3.1±0.09	77.3±1.32	19.6±1.37	16.6±0.10
Pino (t) (n=3)	7.2±0.03	3.5±0.08	91.9±1.60	4.6±1.68	19.5±0.03

¹PCS = Poder Calorífico Superior.

La densidad a granel mostró un valor igual (0.7 g cm⁻³) en los pélets de maralfalfa (Tabla 8) y el testigo comercial (pino), la cual resultó superior al requerimiento internacional (>0.6 g cm⁻³) y a la observada en otros estudios con gramíneas en las que registró un valor de 0.64 g cm⁻³ (Wibowo *et al.*, 2017). La densidad básica mostró valores similares en los pélets de maralfalfa 1.5 g cm⁻³ y el testigo comercial (pino) 1.5 g cm⁻³. El procesamiento de la biomasa favoreció el incremento de la densidad básica, ya que se han observado valores entre 0.295 g cm⁻³ (cedro) hasta 0.502 g cm⁻³ (pino) (Tauro, 2013). El diámetro del pélet fue similar con 5.8 mm en maralfalfa y 5.7 mm en los pélets de pino, por lo que ambos incumplieron la recomendación del intervalo entre 6 y 8 mm (Kofman, 2007), aunque si se cumplió con la norma M7135-Ö (4 a 10 mm). En el caso de la longitud del pélet se obtuvo un valor aceptable en maralfalfa 31.2 mm y pino, aunque en este último se registró un valor

promedio de 26.7 mm (Atuesta y Sierra, 2015). La densidad de los pélets de pino fue mayor (19.5 g cm^{-3}), en comparación con los de maralfalfa, los cuales registraron 16.6 g cm^{-3} , aunque en ambos casos se incumplió con la norma M7135-Ö (Atuesta y Sierra, 2015).

Tabla 8. Valores promedio observados para diferentes variables de densidad y dimensiones evaluadas en pélets de maralfalfa y pino.

Pélet	Densidad a granel	Densidad Básica (g cm^3)	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Densidad (g cm^3)
Maralfalfa (n= 60)	0.7±0.008	1.5±0.16	5.8±0.05	31.2±2.50	16.6±0.10
Pino (t) (n=20)	0.7±0.001	1.4±0.13	5.7±0.04	26.7±2.36	19.5±0.03

El número medio de partes en las que se desintegraron los pélets fue inferior en maralfalfa (1.2), comparada con los de pino (2.4) (Tabla 9). De igual forma la pérdida de biomasa durante la prueba de friabilidad en los pélets de pino fue alta (41.6 %), en comparación con lo registrado en maralfalfa (18.1 %). La friabilidad fue baja en maralfalfa (2.2) en comparación con pino (20.0), donde prácticamente todos los pélets se desintegraron durante la prueba. La maralfalfa muestra posibilidades para su uso en la elaboración de pélets de calidad aceptable, únicamente se requiere la realización de pruebas para optimizar el proceso productivo.

Tabla 9. Valores promedio observados para diferentes variables de friabilidad evaluadas en pélets de maralfalfa y pino.

Pélet	Núm. Partes	Pérdida de Biomasa (%)	Friabilidad
Maralfalfa (n= 60)	1.2±0.65	18.1±11.52	2.2±0.3
Pino (t) (n= 20)	2.4±0.47	41.6±8.47	20.0±0.3

16. Conclusiones

- La maralfalfa, higuera y acacia son especies que pueden utilizarse en el corto plazo para la producción comercial de biomasa con diferentes usos en Durango.
- El álamo blanco y sauce requieren más de un ciclo de cultivo para producir cantidades altas de biomasa de calidad para la generación de bioenergía.
- La maralfalfa mostró niveles altos de crecimiento en vivero y campo, lo que fortaleció su utilidad para la producción intensiva de biomasa de calidad para la generación de energía y elaboración de abono orgánico.
- La densidad alta de población favoreció el rendimiento de biomasa en todos los cultivos energéticos evaluados.
- Es necesario establecer la etapa de aprovechamiento más oportuna para cada especie con base en su productividad y calidad de la biomasa, para la elaboración de biocombustibles.

- El cultivo de maralfalfa representa una opción viable y sostenible para la obtención de biomasa para elaborar los pélets que son utilizados como biocombustible sólido.
- Es necesario ajustar el manejo agronómico para optimizar la producción de biomasa durante el verano. Los pélets de maralfalfa superaron en algunos casos a los elaborados con aserrín de pino y cumplieron con algunas de las normas internacionales de calidad del producto.
- Se requiere el establecimiento de un proceso que optimice la utilización de maralfalfa en la elaboración de pélets de calidad comercial y alcanzar el requerimiento mínimo para el poder calorífico.

17. Referencias

- Abidin, Z., Leksono, A.S., & Kusuma, Z. (2013). The effect of refuge block on the insect visitor to apple crop in Batu, East Java. *Journal of Biodiversity and Environmental Science*, 3: 20-24.
- Aguilar C., J.A. (2017). *Optimización productiva de especies con potencial para la obtención sostenible de biomasa dendroenergética en Durango. Memoria de Estadía*. Universidad Politécnica de Poanas. Villa Unión, Poanas, Dgo. 61 p.
- Álvarez M., C. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, 359: 63-89.
- Álvarez Z., R., Correa R., M.M., Reyes M., J.L., & Castañón A., D.G. (2018). Insectos en plantaciones de *Pinus greggii*, en Durango, México. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 9(21): 1205-1215.
- Atuesta B., L.A., & Sierra V., F.E. (2015). *Caracterización físico-química de pellets producidos a partir de mezclas 50/50 carbón bituminoso/madera residual*. Informador Técnico (Colombia) junio 2015: 18-25. <https://doi.org/10.23850/22565035.133>
- Benemann, J.R. (2008). Opportunities and challenges in algae biofuels production. *Algae World*. Documento en línea consultado el 10 de noviembre de 2009. 15 p. http://www.futureenergyevents.com/algae/whitepaper/algae_positionpaper.pdf.
- Bergman, P.C.A. (2005). *Combined torrefaction and pelletisation*. ECN report, ECNC-C-05-073. Petten. The Netherlands. 29 p.
- Bravo, E. (2008). *Biocombustibles, cultivos energéticos y soberanía alimentaria en América Latina. Encendiendo el debate sobre biocombustibles*. Manthra Editores. Quito, Ecuador. 151 p.
- Caudullo, G., & de Rigo, D. (2016). *Populus alba* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz, J., D. de Rigo, G. Caudullo, T. Houston Durrant, A. Mauri. (eds.). *European Atlas of Forest Tree Species*. Publ. Off. EU. Luxembourg. pp. 134-135.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad). (2017)a. *Salix bonplandiana*. Consultado en línea 22/04/2017. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/62-salic2m.pdf

- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad). (2017)b. *Pennisetum* sp. Consultado en línea 22/04/2017. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/poaceae/pennisetum-purpureum/fichas/ficha.htm>.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2013). *Acacia retinoides* Schlttdl. SIRE-Paquetes Tecnológicos. 24 p. Consultado en línea 08/02/2020. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/876Acacia%20retinodes.pdf>.
- CONAFOR. (2017). *Salix humboldtiana* Willd. Consultado en línea 22/04/2017. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/999Salix%20humboldtiana.pdf>
- Cranshaw, W., Leatherman, D., & Kondratieff, B. (1994). *Insects that feed on Colorado trees and shrubs*. Bulletin 506 A. Colorado State University Coop. Ext. 176 p. Consulted online 05/08/2019. https://static.colostate.edu/client-files/csfs/pdfs/steamboat-district/Insects_Feed_Trees.pdf
- Evans, T.L. (2011). *Biomass production and water use of common plant species in Owens Valley, California, USA*. Consulted on line 14/09/2014. <http://ir.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/21816/Evans%5b1%5d.pdf?sequence=1>.
- Forero N., C.A., Guerrero F., C.A., & Sierra V., P.E. (2012). Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos de gasificación. *ITECKNE*, 9(1): 21-30. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v9i1.57>
- García M., E. (1987). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. 4a. ed. Enriqueta García de Miranda. México, D.F. 217 p.
- Godin, B., Ghysel, F., Agneessens, R., Schmit, T., Gofflot, S., Lamaudière, S., Sinnaeve, G., Goffart, J-P., Gerin, P.A., Stilmant, D., & Delcarte, J. (2010). Détermination de la cellulose, des hémicelluloses, de la lignine et des cendres dans diverses cultures lignocellulosiques dédiées à la production de bioéthanol de deuxième génération. *Biotechnology Agronomy, Society and Environment*, 14(S2): 549-560.
- González-García, M., Hevia, A., Majada, J., & Barrio-Anta, M. (2013). Above-ground biomass estimation at tree and stand level for short rotation plantations of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden in North-west Spain. *Biomass and Bioenergy*, 54: 147-157. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.03.019>
- Hoogwijk, M., Faaij, A.P.C., Eickhout, B., De Vries, B., & Turkenburg, W.C. (2005). Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRES land-use scenarios. *Biomass and Bioenergy* 29(4): 225-257. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.05.002>
- Invasoras.pt. (2017). *Acacia retinoides* (Water Wattle). Consultado en línea 20/04/2017. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/876Acacia%20retinodes.pdf>
- Jiménez O., R., Domínguez M., P.A., Rosales S., R., Nava B., C.A., & Carrete C., F.O. (2014). *Rendimiento y calidad del forraje de maralfalfa. 1er. Congreso Internacional de Investigación Agropecuaria y Forestal*. Edo. Méx. Méx. pp. 188-195.
- Jiménez O., R., Rosales S., R., Domínguez M., P.A., Buendía R., G., Rodríguez G., J.A., Borja B., M., Basave V., E., Gómez R., S., Alanís B., R.E., Cobaleda V., M., Rico P., H.R., & Barrios G., E.J. (2016). *Estrategias para el uso integral de la higuera en México*. Libro Técnico Núm. 13. INIFAP-CIRNOC-Campo Experimental Valle del Guadiana. Durango, Dgo. México. 181 p.

- Kalaisekar, A., Padmaja, P.G., Bhagwat, V.R., & Patil, J.V. (2017). Insect-plant relationships. In: *Insect pests of millets: Systematics, biomimics, and management*. Academic Press. New York, USA. pp. 123-142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804243-4.00004-5>
- Kofman, P.D. (2007). Simple ways to check Wood pellet quality. *COFORD Connects Processing/Products*, No. 11. 2 p.
- Lourenço N., L., Arraes P., P.A., & Ellis, D. (2007). Biofuels in Brazil: An Overview. *Crop Science* 47(6): 2228-2237. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.03.0166>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83(1):47-54. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)
- Medina G., G., Díaz P., G., López H., J., Ruiz C., J.A., & Marín S., M. (2005). *Estadísticas climatológicas básicas del estado de Durango (Periodo 1961-2003)*. Libro Técnico Núm. 1. SAGARPA-INIFAP-CIRNOC-Campo Experimental Valle del Guadiana. Durango, Dgo. México. 224 p.
- Möller, J. (2014). *Comparación de los métodos para la determinación de fibra en pienso y en los alimentos*. Foss. Barcelona, España. 6 p.
- Montes P. de L., J. (2003). Los biocombustibles como carburantes alternativos. *Anales de mecánica y electricidad*, LXXX: 41-45.
- Oliveira B., A., de Brito N., J.F., Cardoso, G.D., & Silva do V., L. (2017). Growth and yield of castor bean (*Ricinus communis* L.) CV. 'BRS Energia' under different spacings. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20(2017): 289-295.
- Parra L., Rojas, C., Catrileo, A., Galdames, R., Mutis, A., Birkett, M.A., & Quiroz, A. (2013). Differences in the fly-load of *Haematobia irritans* (Diptera: Muscidae) on cattle is modified by endophyte infection of pastures. *Electronic Journal of Biotechnology*, 16: 1-13. <https://doi.org/10.2225/vol16-issue5-fulltext-4>
- PND (Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018). *Programa nacional forestal 2014-2018, especial*. México: Gobierno de la República. 144 p. Consultado en línea 5 de junio de 2019. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/4/5382Programa%20Nacional%20Forestal%202014-2018.pdf>.
- Portillo M., L., Rodríguez M., N., Rodríguez O., A., Gómez M., R., & Pérez R., A. (2017). *Manejo de higuera (Ricinus communis L.) para el Valle del Mezquital, Hidalgo*. Universidad Politécnica de Francisco I. Madero. México. 51 p. Consultado en línea 29/05/2019. <http://www.upfim.edu.mx/investigacion/doc/libros/ManualHiguera.pdf>
- Quintero B., Q.R., Silva L., E.E., & Melian C., V. (2014). Cultivos energéticos para la generación de energía eléctrica. In: Rincón M., J.M. y E.E. Silva L. (eds.). *Bioenergía: fuentes, conversión y sustentabilidad*. Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía. Bogotá, Colombia. pp. 57-87.
- Quirino, W.F., do Vale, A.T., de Andrade, A.P.A., Abreu, V.L.S., & dos S. Azevedo, A.C. (2005). Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. *Revista Madeira*, 89: 100-106.
- Ranasinghe, H. (2014). *A socio-economic study on the dendro power project at Kumbalgamuwa, Walapane*. Documento en línea consultado el 20/05/2014. http://projects.nri.org/biomass/conference_papers/walapane_case_study.pdf.
- REMBIO (Red Mexicana de Bioenergía, A.C.). (2011). *La bioenergía en México, situación actual y perspectivas*. Cuaderno Temático Núm. 4. REMBIO, México. 42 p.

- Revels S., F.O., Rosales S., R., Nava B., C.A., Delgado L., E., Cuéllar R., E.I., Carrete C., F.O., & Ríos S., J.C. (2010). Identificación de especies vegetales con potencial para la producción de biocombustibles líquidos en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(1): 45-54.
- Reyes R., C.M., Rosales S., R., Rosales A., S.B., Ríos S., J.C., Ortiz S., I.A., Santana E., S., & Domínguez M., P.A. (2019). Niveles observados para la degradación de las propiedades químicas en suelos usados para la producción agrícola. *Agrofaz-Journal of Environmental and Agroecological Sciences*, 1(1): 21-31.
- Ríos S., J.C., Acuña C., E., Cancino C., J., Rubilar P., R., Navar C., J.J., & Rosales S., R. (2016). Allometric equations commonly used for estimating shoot biomass in short-rotation wood energy species: a review. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2): 193-202. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2015.05.022>
- Ríos S., J.C., Rosales S., R., Jiménez O., R., Domínguez M., P.A., & Carrillo P., A. (2018)a. Calidad de pélets elaborados mediante la densificación de material lignocelulósico de maralfalfa producida en Durango. Memoria de la XXX Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED. Gómez Palacio, Dgo. Méx. pp. 861-867.
- Ríos S., J.C., Rubilar P., R., Cancino C., J., Acuña C., E., Corral R., J.J., & Rosales S., R. (2018)b. Densidad básica de la madera y poder calorífico en vástagos de tres cultivos dendroenergéticos. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47): 253-272. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.157>
- Ríos S., J.C., Rosales S., R., Escobedo R., I., Gutiérrez S., J.V., Nava B., C.A., Fernández M., M., Domínguez M., P.A., & Santana E., S. (2019). Calidad y carga microbiana de la biomasa producida con especies vegetales cultivadas de forma intensiva. *Agrofaz-Journal of environmental and Agroecological Sciences*, 1(1): 43-55.
- Romero S., A. (2010). Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 104(2): 331-345.
- Rosales S., R., & Flores G., H. (2017). *Importancia del agua de riego para la producción sostenible de frijol en Durango*. Folleto Técnico Núm. 91. INIFAP-CIRNOC- Campo Experimental Valle del Guadiana. Durango, Dgo. México. 28 p.
- Rosales S., R., Ríos S., J.C., Sigala R., J.A., Carrillo P., A., & Jiménez O., R. (2017). Adaptación de especies cultivadas en sistema de monte bajo para la producción de biomasa dendroenergética en Durango. *Memoria de la XXIX Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED*. Gómez Palacio, Durango, México. pp. 653-659.
- Rosales S., R., Ríos S., J.C., Jiménez O., R., Carrillo P., A., Nava B., C.A., & Domínguez M., P.A. (2018). Rendimiento y calidad de biomasa en especies cultivadas para obtención de energía y abonos en Durango. *Revista Agro FAZ Edición Especial INIFAP-CELALA*: 139-153.
- Rosales S., R., Reyes R., C.M., Rosales A., S.B., Ríos S., J.C., Ortiz S., I.A., & Valdez O., S. (2019). Common bean monocrop effects on soil chemical degradation in Durango, México. *The Annual Report of the Bean Improvement Cooperative*, 62(1): 93-94.

- Salazar S., L.M., Rosales S., R., Jiménez O., R., Ríos S., J.C., Sigala R., J.A., Carrillo P., A., Domínguez M., P.A., & Martínez F., M. (2015). Optimización calorífica en especies vegetales con potencial para la producción de biomasa dendroenergética en Durango. *AGROFAZ*, 15(1): 147-154.
- Salem, N., Bachrouch, O., Sriti, J., Msaada, K., Khammassi, S., Hammami, M., Selmi, S., Boushah, E., Koorani, S., Abderraba, M., Marzouk, B., Limam, F., & Ben Jemaa, J.M. (2017). Fumigant and repellent potentials of *Ricinus communis* and *Mentha pulegium* essential oils against *Tribolium castaneum* and *Lasioderma serricorne*. *International Journal of Food Properties*, 20: S2899-S2913. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1382508>
- Santana E., S., Rosales S., R., Ríos S., J.C., Becerra L., J.L., Domínguez M., P.A., & Fernández M., M. (2019). Diversidad de insectos en especies vegetales cultivadas en otoño-invierno en el Valle del Guadiana, Durango. *Agrofaz-Journal of Environmental and Agroecological Sciences*, 1(1): 56-67.
- Santos R.L., Freire, F.J., Rocha, A.T., Silva, J.A.A., Tavares, J.A., Sousa Ferreira, E.G.B., & Oliveira, E.C.A. (2015). Elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum.) biomass production as a promising alternative source of energy in Brazil's semiarid area using gypsum. *Australian Journal of Crop Science*, 9(11): 1082-1088.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2014). *Actualización del programa de ordenamiento ecológico estatal. Análisis de cambios de uso de suelo y vegetación*. Gobierno del Estado de Durango. Durango, México. 42 p. Consultado en línea 17/12/2018. http://seigsrnyma.durango.gob.mx/docs/Analisis_Vegetacion_2002_2012.pdf.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2015). *Informe de la situación del medio ambiente en México*. pp. 61-152 p. Consultado en línea 15/02/2020. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap2.html>.
- Souza de, A.P., Alvim K., C.L., Torres, A.F., Pattathil, S., Hahn, M.G., Trinidad, L.M., & Buckeridge, M.S. (2015). How cell wall complexity influences saccharification efficiency in *Miscanthus sinensis*. *Journal of Experimental Botany*, 66(14): 4351-4365. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv183>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant physiology*. Sinauer Associates Inc. Sunderland, MA. USA. pp. 117-119.
- Tauro, R.J. (2013). *Factibilidad técnica-económica de la producción de pellets con residuos de la industria forestal del estado de Veracruz*. Tesis Maestría en Ingeniería Energética. Xalapa, Ver. 103 p.
- Telmo, C., & Lousada, J. (2011). The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. *Biomass and Bioenergy*, 35(5): 1663-1667. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.038>
- UCS (Union of Concerned Scientists). (2007). *Biofuels an important part of a low-carbon diet*. Cambridge, MA. USA. 27 p.
- Wibowo, S., Laia, D.P.O., Khotib, M., & Pari, G. (2017). Characterization of carbon pellets made from elephant grass (*Pennisetum purpureum* Scumach) mixed with Nyamplung Shell (*Calophyllum inophyllum* Linn.). *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 35(1): 73-82. <https://doi.org/10.20886/jphh.2017.35.1.73-82>

- Yilangai, R.M., Chaskda, A.A., Akwashiki, O., & Mwansat, G.S. (2015). Effect of time of day, weather parameters and fruit stage on insect visitor of *Carissa edulis* Vahl and *Jasminum dichotomum* Vahl in a protected Nigerian habitat. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology* 9: 23-27.
- Yoon, J., Choi, H., & An, G. (2015). Roles of lignin biosynthesis and regulatory genes in plant development. *Journal of Integrative Plant Biology*, 57(11): 902-912. <https://doi.org/10.1111/jipb.12422>
- Zhang, A.-P., Liu, C.F., Sun, R.C. & Xie, J. (2013). Extraction, purification, and characterization of lignin fraction from sugarcane bagasse. *BioResources*, 8(2): 1604-1614. <https://doi.org/10.15376/biores.8.2.1604-1614>
- Zinoviev, S., Arumugam, S., & Miertus, S. (2007). *Background paper on biofuel production technologies*. Working Document. ICS-UNIDO. Trieste, Italy. 106 p.

Potencial energético de residuos de ocho cultivos agrícolas en México

Artemio Carrillo-Parra^{1*}, Víctor Daniel Núñez-Retana¹,
José Ángel Prieto-Ruíz² y Fortunato Garza-Ocañas³

¹Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, Universidad Juárez del Estado de Durango. Boulevard del Guadiana No. 501. Cd. Universitaria, Durango, México.

²Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Durango, México.

³Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, Nuevo León, México.

*Autor para correspondencia: acarrilloparra@ujed.mx

1. Introducción

La biomasa es una de las fuentes renovables de energía más abundantes y versátiles en el mundo (Valdez-Vazquez, Acevedo-Benítez y Hernández-Santiago, 2010), se estima que anualmente se producen alrededor 1,880 toneladas (Shahbaz, Yusup, Inayat, Patrick, y Ammar, 2017). Una parte de la biomasa contribuye con el 14% de la producción mundial energética y es subutilizada durante las actividades agrícolas e industriales (Liu *et al.*, 2014; Sadh, Duhan, y Duhan, 2018). La disposición de los residuos agroindustriales ha tenido diferentes enfoques a lo largo de la historia; primero fueron considerados insumos para generar otros productos, después, como insumos para reducir impactos ambientales, y recientemente se ha considera para generar alimentos para ganado y productos bioenergéticos (Saval, 2012).

El aprovechamiento de los residuos agrícolas e industriales puede ser muy variable, por ejemplo la industria cervecera emplea el 8% de los residuos del grano, la industria de aceite de palma utiliza menos del 9% y la industria cafetera genera residuos hasta por 90.5%, de los cuales no existe información acerca de su uso (Cury, Aguas, Martínez, Olivero, y Ch, 2017). Por otra parte, Ajila *et al.* (2007) y Di Donato *et al.* (2011), citados por Adi, Oduro y Simpson (2019) consideran que alrededor del 30 al 50% del material original de las frutas u hortalizas producen residuos no utilizados e.g. tallos, hojas, cáscaras, orujo, semillas, cortezas y pulpa no utilizadas.

La biomasa residual de los cultivos agrícolas aporta cantidades significativas de energía a partir de las podas y del remplazo total de los árboles (Jones, Loeffler, Calkin,

y Chung, 2010). Los residuos agroindustriales son categorizados como “A” a la biomasa generada durante actividades de cosecha, y “B” a la biomasa generada durante la industrialización (Unal y Alibas, 2007).

México ocupa a nivel mundial el lugar número 13 en la producción mundial de alimentos con aproximadamente 818 productos agrícolas, de los cuales es el principal productor en 71 de ellos (Carrillo-Nieves et al., 2019). Debido a los altos niveles de producción México, se generan gran cantidad de residuos agroindustriales no comerciales que pueden utilizarse como alternativas renovables (Mejías-Brizuela, Orozco-Guillén, y Galáan-Hernández, 2016).

En México se cultivan ca. 28.84 millones de hectáreas de mango, palma africana, limón, naranjo, algodón, nuez, manzano y agave, (Food and Agriculture Organization [FAO], 2018). Todos ellos generan importantes volúmenes de residuos agroindustriales cuyo potencial y aporte energético no están cuantificados. Por lo anterior, el presente capítulo recaba información general disponible de cada cultivo, como origen, preferencia de consumo, superficie plantada en México, producción de residuos y caracterización energética de la biomasa o diversos biocombustibles sólidos.

2. Descripción de los cultivos y potencial bioenergético

MANGO

Nombre científico: *Mangifera indica* L.

Descripción

Es un fruto succulento, carnoso, de forma arriñonada u oval, de color verdoso, amarillento, rojizo, muy dulce y que encierra un hueso o cavoso grande, aplanado, rodeado de una cubierta leñosa; los hay esféricos y aplanados, como el mango de manila, que es uno de los más apreciados; su contenido en azúcares alcanza más del 20% y es destacado por su aporte de vitamina C, su efecto laxante, diurético y muy saciante (Rengifo y Rodríguez 2012).

El mango es una especie tropical arbórea, de vegetación permanente, que puede alcanzar de 10 a 40 m de altura (Figura 1). Su sistema radicular es bastante particular: cuando la planta es joven, este se profundiza rápidamente, pero tiene muy pocas raíces laterales. El mayor porcentaje de raíces de mango se encuentra concentrado hasta 1.20 m de profundidad (Saúco, 2009). Aquellos árboles que crecen en sitios con suelos de textura de mediana a gruesa, tienden a desarrollar raíces pivotantes muy profundas y raíces laterales hasta una profundidad de por lo menos 1.7 m (Francis, Lowe y Trabanino, 2000).



Figura 1. Huertas de mango en Escuinapa, Sinaloa, México.

En México el mango se desarrolla adecuadamente en climas cálidos y secos, que se encuentran desde la zona costera del oriente, centro y occidente, hasta zonas de media altura, con temperaturas de 26 a 32 °C y una precipitación promedio de 1,000 a 1,500 mm. Prospera en terrenos profundos de textura media, bien drenados, con pH de 6 a 8 (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2017a).

Origen

India es reconocida como el centro de origen del mango, sin embargo fue introducido hace muchos años en la costa este de África a través de los árabes, en Madagascar y en los puertos del océano Índico. Según Bailey (1941) este frutal se introdujo en México y Brasil a finales del siglo XVII, y de Brasil a las Indias occidentales durante el siglo XVIII (Citado en Santos-Villalobos *et al.* 2011).

Preferencia de consumo

Los productos procesados, incluyen jugo de mango, mangos encurtidos, salsa picante de mango, pulpa de mango, pasta de mango, puré de mango, mango seco, tajadas de mango en salmuera, y harina de mango (Evans, 2009). Es considerado una fruta altamente saludable; su elevado contenido de agua (86.1%) constituye una agradable forma de hidratarse (SAGARPA, 2017b).

Formas de plantación

Si bien puede sembrarse por semilla, este método no es aconsejable debido a que no conserva el 100% de las características de la planta madre y por el tiempo que se tarda en producir frutos. Dada la importancia económica que ha alcanzado en los últimos años, la propagación por medio del injerto es el sistema utilizado para todas las variedades (Urbina-Vallejo, 2005).

Existen básicamente dos estilos de plantación del mango en América Latina (con excepciones). Estos sistemas de plantación van a depender de la fertilidad del suelo, la variedad y del método de propagación (Cisneros y Montaña, 2000). Estos sistemas son en general; el sistema de alta densidad y el sistema de baja densidad. En el de baja densidad los rendimientos por lo general son aceptables. Sin embargo, la tendencia de los productores especializados al sistema de alta densidad, se ve bien justificado por rendimientos

significativamente elevados. El Tabla 1 presenta el espaciamiento entre plantas de acuerdo al sistema de plantación según la densidad de plantas.

Tabla 1. Sistema de plantación y número de plantas/ha de mango utilizados en México.

Forma y espaciado	Nº. plantas/ha
Cuadrado de baja densidad	
12 x 12 m	69
10 x 10 m	100
8 x 8 m	156
Rectangular baja densidad	
10 x 8 m	125
Altas densidades	
4 x 4 m	625
4 x 5 m	500
5 x 4 m	500
3 x 2.5 m	1,333

Fuente: (Agrotendencia, 2020).

Superficie, producción anual y estados que lo cultivan en México

La producción de mango para el 2013 en México fue de 1,603,810 t, valor ligeramente menor (6%) a la producción registrada un lustro atrás (1,716,537 t). El decremento absoluto en ese período fue de 112,727 t. El mango manila fue la variedad más importante con una producción de 395,354 t para 2008 (Rodríguez, Osuna, Amezcua, Salazar y Sanchez, 2015). Por otra parte, el estado de Guerrero se mantuvo como el productor número uno con 353,000 t, que representaron el 22% de la producción nacional. La segunda posición la ocupó Nayarit que desplazó a Sinaloa a la tercera posición, mientras que Oaxaca se mantiene en el cuarto sitio, Chiapas en quinta posición y en la sexta posición Michoacán que desplazó a Veracruz al séptimo sitio. Al igual que hace un lustro, las seis entidades principales aportaron el 81% de la producción nacional (SAGARPA, 2015a). No obstante a los esfuerzos para incrementar la eficiencia en durante la producción, se calcula que 1.8 millones de toneladas al año son desperdiciadas a nivel nacional, lo que representa un 54.54% de la cosecha anual de mango (Camacho, Bautista, León, y Antonio, 2017).

El rendimiento promedio por hectárea es fluctuante debido a factores como precipitación, temperatura y presencia de ciertos fenómenos climáticos como huracanes. Se tiene que en el año 2013 disminuyó la producción con respecto al 2008, al pasar de 9.96 a 9.0 t/ha (casi un 10% de reducción en el indicador nacional). Doce entidades registraron rendimientos superiores a la media: Morelos, Campeche, Sonora y Guerrero con más de 14 t/ha; otro grupo lo conformaron Colima, Yucatán, Nayarit, Estado de México, Tamaulipas y San Luis Potosí con un rendimiento entre 10 y 14 t/ha; Jalisco y Oaxaca son otras entidades que rebasan ligeramente el indicador promedio nacional (SAGARPA, 2015b).

Producción de residuos

En México no existen reportes disponibles del volumen de los residuos que se generan durante el cultivo e industrialización de mango. Sin embargo, se considera que estos sean similares a lo reportado en otros países; en Colombia se estima que aproximadamente 50% de los residuos presentan graves problemas de contaminación en su disposición final. Esto debido a los elevados volúmenes de generación y al alto contenido de azúcares (Santos-Villalobos *et al.*, 2011). La Figura 2 muestra leña de mango resultado de árboles derribados por el huracán Willa, que en 2018 afectó seriamente la zona productora de mango de la costa de Sinaloa, México.



Figura 2. Leña de residuos agrícolas del cultivo de mango (leña).

La Figura 3 muestra la colecta y confinamiento de residuos de mango generados durante la producción de "orejones de mango", que es un aperitivo hecho a base de la pulpa de mango deshidratada que se produce extensamente en México.



Figura 3. Colecta y confinamiento de residuos industriales de mango (cáscara y hueso).

Actualmente, se han realizado esfuerzos en el aprovechamiento de residuos de mango. Se utiliza como alimento para ganado, preparación de pectina y fibra dietética, y en la extracción de grasa vegetal del hueso del mango (Martínez, Teresa, Sánchez, Torres y García, 2012). Otros posibles usos son la elaboración de jugos, intensificador de

color y para aumentar el rendimiento durante el proceso de producción de harinas (Trejo-Márquez, 2010). Además, se ha reportado que en México un porcentaje de los residuos del cultivo del mango también se utilizan para deshidratar hortalizas (Figura 4). Por otra parte, los residuos de la industrialización del mango pudieran ser utilizados para la generación de calor después de ser transformados en otros productos.



Figura 4. Uso de residuos de huertas de mango en la deshidratación de chile. A y B) Dispositivos para la deshidratación, C) Chile deshidratado.

Caracterización energética

Las características energéticas de los residuos de mango se presentan en el Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización energética de residuos agroindustriales de mango.

Descripción de la biomasa	Contenido de humedad (%)	Material volátil (%)	Contenido de cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico (MJ/kg)
Hueso de mango	6.44	79.02	3.67	17.31	19.42
Pulpa y hueso de mango fresco	10.80	79.16	3.19	17.65	19.51
Pulpa y hueso de mango seco*	5.27	73.02	11.82	15.16	17.57

*Deshidratado con cal.

Los residuos de mango presentan un contenido de cenizas y poder calorífico superior de 2.14% y 18.05 MJ/kg, respectivamente. Perea-Moreno, Perea-Moreno, Dorado y Manzano-Aguigliaro (2018) reportan un poder calorífico superior a 12.56 MJ/kg (Citado en Quintero y Quiroga (2017).



La Figura 5. muestra huesos de mango en proceso de deshidratación y harina de hueso de mango. A) Hueso de mango en proceso de deshidratación, B) Hueso de mango y C) Harina de hueso de mango.

PALMA AFRICANA

Nombre científico: *Elaeis guineensis* Jacq.

Descripción

La palma es una planta monoica (con flores femeninas y masculinas), generalmente de tallo único y esbelto, rara vez ramificado, liso o áspero, cubierto de fibras, espinas, etc. (Quintana, Arroyave y Suárez, 2008). Las palmeras jóvenes desarrollan durante sus primeros años su yema apical o palmito y su sistema radicular lanzando hojas más grandes, y solo cuando han adquirido su grosor definitivo empiezan a tomar altura, manteniendo siempre un diámetro constante a lo largo de todo el tallo (Vega, 1994).

Los frutos de la palma pueden ser “nigrescens” o “virescens”. Los primeros son de color negro y los segundos de color verde. Cuando maduran los frutos de color nigrescens adquieren un color rojo, mientras que los frutos de color virescens se tornan de un color naranja amarillento (Franco, 2010).

De acuerdo a las condiciones edáficas y climáticas, se desarrolla en profundidades del suelo mayores a 75 cm, no inundables a drenaje imperfecto. Pendiente menor al 12% y salinidad menor a 1.0 mm hos/cm. El pH entre 4 y 6; y capacidad de intercambio catiónica mayor que 16 mol + y un valor mayor a 20% de bases intercambiables. Precipitación mayor que 1,800 mm/año; temperatura promedio anual entre 22 y 28 °C. Humedad relativa mayor que 18%; sitios con una altura sobre el nivel del mar menores a 300 m, con más de 2,000 horas de sol por año (SAGARPA, 2017c).

Preferencia de uso

De acuerdo con SAGARPA (2017c), la importancia de la palma africana radica en el comercio internacional del aceite. El aceite de la palma se utiliza en un sinnúmero de productos industriales como aceites comestibles, mantecas, mantequillas, panificación, helados, detergentes líquidos, shampoo, tinta-pinturas, cosméticos, lubricantes y biodiesel, entre muchos otros. Además del aprovechamiento para consumo humano del aceite también se utiliza como materia prima para la producción de biodiésel y otros biocombustibles (SAGARPA, 2010).

Origen

La palma tiene su origen en los países africanos, ha sido exportada a varias partes del mundo y cruzada con especies locales para crear híbridos que incrementan el nivel de producción (Corley y Tinker 2009).

Formas de plantación

Para establecer el cultivo de palma se prepara el terreno con un chapeo, barbecho rastra y cruza. Se realiza el trazo, el balizado y la holladura; esta última, de 5 a 10 cm mayor que el diámetro de la bolsa de vivero. La siembra se realiza al inicio de las lluvias. La densidad de plantación oscila entre 146 y 160 palmas/ha dependiendo la variedad (SAGARPA, 2017c) (Tabla 3).

Tabla 3. Espaciamiento de las bolsas en un vivero según el tiempo de permanencia de las plántulas y calidad del vivero (Borrego, 2020).

Edad (meses)	Espaciamiento		Capacidad vivero (plántulas/ha)
	Entre bolsas	Entre líneas	
8-10	80	69.28	18,040
10-12	90	77.94	14,260
12-14	100	86.80	11,550
>14	120	103.92	8,020
24	180	155.88	3,560

Superficie, producción anual y estados que lo cultivan en México

De acuerdo al Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2018), la producción nacional de palma africana o de aceite para el año 2017, fue de 873.5 millones de toneladas en una superficie de 65,805 ha, las cuales se produjeron en los estados de Veracruz y Tabasco, que en conjunto aportaron el 28.9% del volumen total, Chiapas aportó el 57.3% y por último Campeche participó con el 13.8% restante. No obstante, el país sigue siendo deficitario en la producción de aceite de palma, ya que sólo produce 20% del consumo interno anual (Isaac-Márquez *et al.*, 2016). Por otro lado, las importaciones provienen principalmente de Guatemala, Costa Rica y Colombia (SAGARPA, 2017c). En México el rendimiento nacional promedio es de 12.8 t/ha. El estado productor más importante es Chiapas con el 79%, seguido de Veracruz con el 13% y después Tabasco y Campeche.

Por otra parte, el rendimiento promedio nacional anual es de 12.8 t/ha, lo que equivaldría de 2 a 4 t de aceite y de 600 a 800 kg/ha/año de almendras (Aguilar-Gallegos *et al.*, 2016).

Producción de residuos

No existen datos disponibles del volumen de residuos sólidos generados durante la industrialización de palma africana en México; sin embargo, se ha publicado que los subproductos del campo son diferentes a los residuos liberados en la operación de las plantas de beneficio. Se estableció que por cada tonelada de aceite de palma, se dispone aproximadamente de 350 kg de racimos de frutos vacíos (peso seco), generando aproximadamente 20 millones de toneladas al año en el mundo (Van Dam, 2017a). Los racimos de fruto vacío son el subproducto más problemático y voluminoso de las plantas de beneficio, por lo que se han hecho muchos esfuerzos para desarrollar usos alternativos (Rhoades, 2011). También, en el aprovechamiento del aceite de palma se produce el cuesco de palma y “la torta”, de los cuales del primero se producen aproximadamente de 10 a 15 millones de toneladas al año en el mundo, y del segundo aproximadamente 3 millones de toneladas al año en el mundo (Van Dam, 2017b). En la Figura 6 se muestran residuos de palma africana generados en el sur de México.



Figura 6. Residuos de palma aceitera en el sur de México.

Respecto al uso de los residuos, Malasia como segundo productor en el mundo, inició la investigación de la producción de pulpa para papel de estos residuos (Moradi, Teh, Goh, Husni, y Ishak, 2014). Las fibras pulpeadas bajo los procesos de soda (NaOH) generan el mayor contenido de lignina y holocelulosa. Las producidas con el sistema soda-AQ tiene el más alto contenido de alfa – celulosa y viscosidad, y las producidas mediante kraft-AQ tienen el mayor contenido de glucosa y el menor contenido de arabinosa, manosa y galactosa (Quintana, Arroyave y Suárez, 2008). Por otra parte, se considera factible la producción de fertilizantes a partir de los racimos vacíos, fibra del pericarpio y huesco de la palma africana, además de la producción de carbón vegetal, carbón activado, papel y cartón (Kirkaldy y Sutanto 1976).

Caracterización energética

Las características energéticas de la biomasa de palma africana se presentan en el Tabla 4. El elevado contenido de material volátil, carbono fijo, poder calorífico y el bajo contenido de ceniza, hacen que este residuo sea adecuado para la generación de calor. El poder calorífico (19.84 MJ/kg) de la biomasa de palma establecido por Contreras-Trejo (2018) es similar a lo presentado Loh (2017) para frutos (18.88 MJ/kg), fibras (19.06 MJ/kg) y hueso del fruto de palma (20.09 MJ/kg). La energía liberada por la combustión en especial por el hueso del fruto y la fibra de palma, puede ser utilizada en los procesos industriales de extracción de aceites de la misma palma (Onoja, Chandren, Razak, Mahat, y Wahab, 2018). No obstante a lo anterior, el contenido de humedad >10 % dificulta en algunos casos la conversión termoquímica de este residuo (McKendry, 2002), por lo que se considera factible su transformación a otros productos que incluya un proceso de secado.

Tabla 4. Análisis proximales y características energéticas de la biomasa de palma.

Descripción de la biomasa	Contenido de humedad (%)	Material volátil (%)	Contenido de cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico (MJ/kg)
Biomasa de palma	7.58	83.95	0.52	15.54	19.843

Fuente: Contreras-Trejo (2018).

Por otra parte, según los resultados presentados por Contreras-Trejo (2018), la biomasa residual de palma africana presenta características físico-químicas ideales para la elaboración de pélets (Figura 7). Los pélets generados de esta biomasa presentan un contenido de humedad inferior al 10%, contenido de cenizas de 0.5%, el material volátil de la biomasa superior al 79.4%, y el poder calorífico superior a 20.7 MJ/kg (Tabla 5).

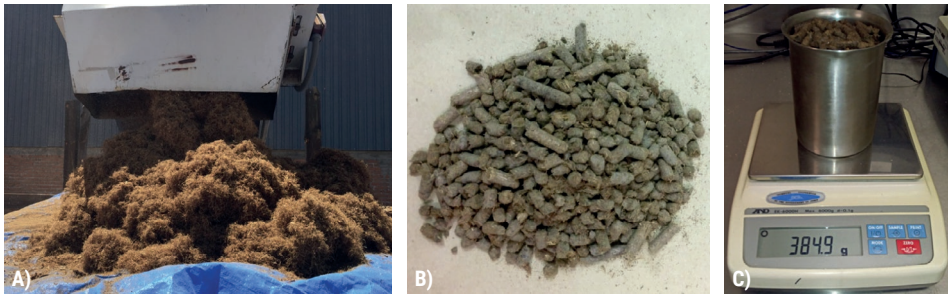


Figura 7. A) Fibra de palma africana molida, B) Pélets de palma africana y C) Proceso para determinar la densidad a granel de pélets de palma africana.

Tabla 5. Caracterización energética de pélets de residuos agroindustriales de palma africana.

	Característica	Unidad	Promedio	Desviación estándar
Análisis proximales	Contenido de humedad	%	6.5	0.3
	Material volátil	%	79.4	1.9
	Cenizas	%	0.5	0.1
	Carbono fijo	%	20.1	1.8
Características energéticas	Poder calorífico superior	MJ/kg	20.7	324
Propiedades físicas	Densidad a granel	kg/m ³	0.6	0
	Densidad de partícula	kg/m ³	1.2	0
Propiedades mecánicas	Friabilidad	-	61	20

Fuente: Contreras-Trejo (2018).

La biomasa residual de la palma africana se puede mezclar con aserrín de pino para mejorar las propiedades físicas (Figura 8) (Contreras-Trejo, 2018).

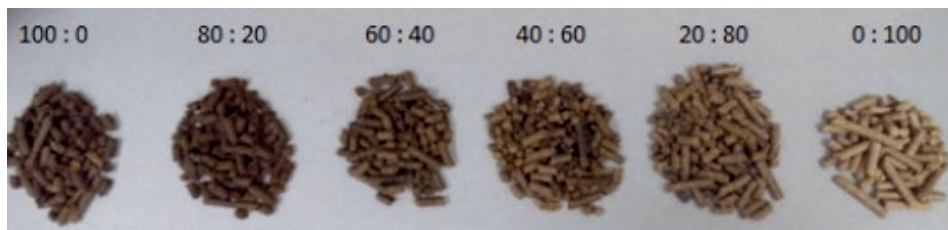


Figura 8. Pélets elaborados a partir de mezclas de residuos de palma africana y aserrín de pino en proporciones (Palma:Pino) de 100:0 a 0:100 (Imagen tomada de Contreras-Trejo (2018)).

La densidad a granel de pélets elaborados a partir de cáscara de la palma de aceite presenta valores adecuados para ser transportados y almacenados. Además de presentar otros parámetros con valores similares a la biomasa leñosa (Tenorio, Moya y Valaert 2016). Por su parte Brunerová, Müller, Šleger, Ambarita y Valášek (2018), concluyen que la mayoría de los parámetros presentan valores adecuados para la generación de bioenergía a excepción del porcentaje de cenizas (10%), y que este podría ser una limitante de su uso.

LIMONERO

Nombre científico: *Citrus latifolia*.

Descripción

El limón persa es una planta de tamaño medio a grande que raras veces sobrepasa los 4 m de altura, de crecimiento vigoroso y de forma extendida (Figura 9). El follaje es denso y de color verde, con hojas de tamaño medio lanceoladas y con peciolo alado. Las flores son pequeñas y blancas, y a su fruto se le llama limón (Aznar, 1999).



Figura 9. Poda de árboles de limón en Martínez de la Torre, Veracruz, México.

El fruto es pequeño y redondo, con una leve protuberancia en la extremidad, y la mayor parte de su producción (90%) ocurre en los meses de junio a septiembre, época que coincide con los precios más bajos en los mercados nacional e internacional (Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria en México [ASERCA], 2002). No mide más de 5 cm en las variedades comunes; su cáscara es fina y verde (amarilla en la madurez), con pulpa jugosa y muy ácida, dividida en 9 a 12 gajos. Contiene vitaminas C y B; proporciona calcio, fósforo y hierro (Puente Huera, 2011).

La temperatura óptima del cultivo para su buen desarrollo es de 22 a 28 °C, con mínima de 17 °C y máxima de 38.6 °C. Las altitudes donde se desarrolla adecuadamente van de 200 a 900 msnm, y precipitaciones de 1,200 a 2,000 mm anuales. Requiere un suelo franco, arenoso y profundo y un pH de 5.5 a 7. La temperatura influye en el tiempo de la floración hasta la maduración, acortándose en zonas de clima cálido, y alargándose en regiones frescas y frías, pudiendo variar de dos a cuatro meses (SAGARPA, 2017d).

Preferencia de consumo

Se utiliza en fresco para recetas culinarias, y su zumo en la industria de preparados alimenticios, para elaborar jugos, jaleas, dulces, salsas, bebidas entre otros. Además, se pueden producir aceites esenciales o esencias, concentrados, pectinas, ácido cítrico, cáscara cristalizada, fermentos, entre otros aprovechamientos. Por su fuerte poder antibacterial y antiviral, el limón es un producto importante para la salud humana (Patil, Murthy, Jayaprakasha, Chetti y Patil, 2009).

Origen

Los árboles de limón fueron introducidos por los colonos españoles a lo que es hoy República Dominicana (Vanegas, 2002).

Formas de plantación

La siembra debe hacerse en cepas de 30 cm de diámetro y 50 cm de profundidad. Se realiza en camas que deben medir 10 m de largo y 1.2 m de ancho, con tierra mullida que contenga dos partes de tierra franca por una de abono vegetal descompuesto. El fondo debe rellenarse con tierra de modo que el cuello de la raíz de las plantas quede al nivel del suelo o ligeramente arriba. Si parte del tallo queda enterrado en el suelo se tendrán problemas de enfermedades, y si el cuello de la raíz queda por arriba del suelo las plantas se pueden ladear o las raíces destapar con los primeros riegos (Araiza-Flores y Cruzaley-Sarabia, 2003).

Con altas densidades de plantación como 8 x 4 m, se aprovecha eficientemente el terreno, se hace uso óptimo de la energía solar, el agua y los nutrientes, obteniendo los más altos rendimientos en una menor área de suelo. Con esta práctica por lo menos se duplica la producción en los primeros 5 años de cosecha y se recupera rápidamente la inversión. El Tabla 6, muestra las diferentes densidades plantación del limón con las ventajas y desventajas de cada opción.

Tabla 6. Densidades, ventajas y desventajas de diferentes densidades de plantación de limón.

Distancia de plantación (m)	Número de plantas por hectárea (marco real)	Ventajas	Desventajas
8 x 8	156	Es buen número de árboles por hectárea, se facilita la plantación y la poda manual.	El rendimiento es menor que en densidades mayores.
8 x 4	312	Se tienen rendimientos elevados en los primeros años y en la etapa adulta.	Al presentar menor distancia entre árboles, se facilita en algunas ocasiones la poda mecánica.
9 x 5	222	Se tiene buen rendimiento en huertos jóvenes y adultos. Se tienen las calles abiertas para la poda manual, al tener mayor densidad, los costos son menores.	Menor rendimiento y mayor costo cuando se realiza la poda mecánica.

Elaborado a partir de Aguilar, Mendoza, Pedro, y Becerraasesor (2011).

Superficie, producción anual y estados que lo cultivan en México

La producción de limón mexicano ha mostrado un comportamiento coyuntural atípico derivado de factores como el clima y la estacionalidad. México es el segundo exportador de limón a nivel mundial con 12.29% del valor de las exportaciones mundiales (SIAP, 2016).

En el año 2014, Veracruz fue el principal estado productor nacional, aportó 65% del volumen total anual de limón 'persa' y obtuvo 136 millones de dólares anuales por la exportación de este producto. Para el año 2017, los principales estados productores de limón mexicano fueron Colima, Michoacán, Oaxaca y Guerrero.

La producción de limón en México (incluye los tipos mexicano y persa) en 2013, fue de 2,095,881 t, cifra superior en 40,000 t a lo obtenido en 2012 (Almaguer-Vargas y Ayala-Garay, 2014). Así, la industria de subproductos del limón persa en México está enfocada a la producción de aceites esenciales, de la cual también se obtiene la cáscara deshidratada que es vendida al extranjero para la extracción de pectina principalmente (Noguera, Corzo y Vázquez 2014).

Producción de residuos

La biomasa residual calculada de los residuos agrícolas del limón consistentes en hojas, residuos de podas y fustes de árboles se calculan en 2.5 t/ha. Por otra parte, a partir del limón procesado industrialmente, se generan 85% de residuos finales que consiste en los llamados caldos residuales, los cuales poseen de 23 a 24% de sólidos, estimándose en 372.71 t/año de residuos que pueden ser utilizados de alguna manera (Moncayo, Reyes y Carrillo, 2018; SAGARPA 2017d).

Caracterización energética

El poder calorífico de los residuos agrícolas de limón puede ir de 21.93 a 22.79 MJ/kg (Carrillo-Parra *et al.*, 2019) (Tabla 7). En estudios similares con hojas y podas de limón se reportan rangos de 9.16 a 10.40% de contenido de humedad; 3.77 a 9.70% de cenizas; 73.2 a 81.02% de material volátil, 15.21 a 17.10% de carbono fijo; y 17.18 a 17.67 MJ/kg de poder calorífico superior (Díaz *et al.*, 2018; García, Pizarro, Lavín, y Bueno, 2014) with properties varying depending on its origin or the geographical region where it is obtained. Because of that, the development of predictive equations which are specific for the characteristics of certain regions' biomass is recommended. In this work, some correlations were obtained to relate the higher heating value (HHV).

Tabla 7. Contenido de humedad, material volátil, cenizas, carbono fijo y poder calorífico de hojas, ramas y fuste de limón.

Descripción de la biomasa	Contenido de humedad (%)	Material volátil (%)	Contenido de cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico (MJ/kg)
Hojas	5.10	3.57	52.16	39.17	22.79
Ramas	5.45	3.87	52.21	38.47	22.55
Fuste	7.62	3.95	51.20	37.23	21.93

Fuente: Carrillo-Parra et al. (2019).

El bagazo de limón también puede ser fuente de energía. Según la caracterización energética del bagazo de *Cirus limonia* Osbeck realizada por Figueiredo *et al.* (2017), los valores de material volátil, cenizas y carbono fijo fueron de 28.57, 7.17 y 68.71% respectivamente, y el poder calorífico de 16.53 MJ/kg.

En términos generales, se puede concluir que los residuos agrícolas y agroindustriales de los frutos y cultivo de limón son aptos para ser empleados como combustible.

NARANJO

Nombre científico: *Citrus sinensis*.

Descripción

El naranjo es un árbol de la familia de las rutáceas, de tamaño mediano (7 a 10 m), recto si es de semilla, de copa ancha y redondeada si es injerto. Presenta tallos ligeramente espinosos, hojas coriáceas, elípticas, agudas, con el pecíolo provisto de alas estrechas y espinas en sus axilas, las flores blancas, perfecta (bisexual) y autofértil en la mayoría de las variedades, es decir, que no necesita polinización cruzada, con cinco pétalos y numerosos estambres (Geilfus 1989).

El fruto es carnoso liso de sabor dulce o agrio y tiene tres partes visibles: exocarpo, epicarpo o flavedo (cáscara, con vesículas con aceites esenciales), el mesocarpo que es la parte media con textura pomposa y color blanco, y el endocarpo que se encuentra en la parte interior con once tricomas, gajos u hollejos con jugo (Acebo-Muñiz 2018).

Prefiere los suelos permeables y poco calizos, con pH de 5.5 a 6. La temperatura óptima para su desarrollo es de 20 a 25 °C. Necesita una precipitación media anual de 1,200 a 2,000 mm (SAGARPA, 2017d).

Preferencia de consumo

La naranja se consume como fruto completo, o sus derivados para hacer postres o ensaladas. Los derivados principales son los aceites esenciales que se utilizan en las industrias de perfumes, dulces, alimentos y farmacéutica. El jugo de naranja se comercializa como jugo fresco, pasteurizado, concentrado, pulposo y clarificado; así como concentrado en polvo (Espinoza-Zamora *et al.*, 2019).

Origen

El árbol de naranja se originó en el sur de China y en Birmania, pasó después a Japón y a India. Se cree que los árabes la llevaron a España, Vasco de Gama plantó naranja en Lisboa y después la llevaron a América. Bernal Díaz de Castillo sembró sus semillas en México y después llegó a Florida (Fálder-Rivero 2003).

Formas de plantación

La plantación debe hacerse en cepas de 40 x 60 cm; de preferencia cuando exista humedad en el suelo (de preferencia agregar un poco de estiércol de bovino mezclado con la tierra), y ubicar la planta de tal forma que el cuello quede ligeramente encima del nivel del terreno. Al hacer la cepa, debe separarse el suelo superficial que es más fértil, del obtenido en el fondo; y al momento de plantar se debe invertir la posición, para que el suelo más fértil

quede debajo de las raíces, con el fin de favorecer su desarrollo y evitar enfermedades (del Rosal y Tapia-Ríos 2003).

Las distancias de plantación varían de acuerdo al sistema de plantación y producción:

- Plantación a una distancia definitiva (8 x 8 m.) Es la que no requiere la eliminación de árboles, ni manejo especial o intensivo en edad adulta.
- Sistema rectangular (8 x 4 m.) A 8 m entre hileras y 4 m entre árboles, obteniéndose así un promedio de 312 árboles por hectárea, con este sistema la producción por hectárea en los primeros 5 o 6 años es en promedio 100% superior a la obtenida en el método tradicional.
- Sistema marco real. En este sistema se tienen 8 m entre hileras y entre árboles, el promedio es de 156 árboles por hectárea, este sistema de producción llega a ser igual al sistema de 8 x 4 m a los 10 o 12 años, sin que requieran de ciertas cantidades de fertilizantes y de agua o un manejo semi-intensivo, las labores agrícolas pueden realizarse sin tanta dificultad en dos sentidos.
- Tresbolillo. Consiste en alternar la colocación de los árboles de modo, que estos vayan formando un triángulo y por consiguiente la distancia entre plantas e hileras es la misma (González-López 2014) (Tabla 8).

Tabla 8. Distancias de plantación para huertas de naranjo según tipo de suelo.

Tipo de suelo	Distancia entre árboles (m)		Número de árboles por hectárea		
	Marco real y Tresbolillo	Rectángulo	Marco real	Tresbolillo	Rectángulo
Ladera	6 x 6	6 x 4	278	319	416
Plano pesado	7 x 7	7 x 4	204	235	357
		8 x 4	-	-	313
Plano ligero	8 x 8	8 x 5	156	180	250

Superficie, producción anual y estados que lo cultivan en México

En México, la naranja fue el cultivo perenne con la mayor superficie sembrada en 2016 con 335,336 hectáreas (SAGARPA, 2017d). La naranja es la fruta más importante en México por su precio accesible, se comercializa en todos los estratos económicos y genera una gran actividad económica en toda la cadena productiva, desde las actividades de provisión de insumos, mantenimiento y producción de huertos, transportación, comercialización, empaque de fruta, industrialización y servicios (Ramos-Novelo 2003). Sin embargo, la rentabilidad del cultivo de naranja es la segunda más baja de todos los cítricos debido al bajo precio de venta del producto.

México es el quinto productor mundial de naranja, con un volumen promedio de 4.2 millones de toneladas, las cuales se comercializaron tanto en el mercado interno como en destinos internacionales (SAGARPA, 2017d). Las principales entidades productoras de este fruto son Veracruz (44.5% del volumen nacional), Tamaulipas (14.6%) y San Luis Potosí (8.8%), estados que conjuntan el 67.9% del total cosechado en el país. Otros productores son Nuevo León, Puebla, Yucatán, Sonora, Tabasco, Hidalgo y Oaxaca (SAGARPA, 2017d).

Producción de residuos

Los residuos generados de la naranja son la cáscara y el bagazo, los cuales se generan cuando se obtiene el jugo de la fruta, en caso de que se ingiera el fruto completo no hay bagazo como desecho. La cáscara es el principal residuo aprovechable de la naranja, es un desecho rico en aceites esenciales, azúcares y pigmentos (Moncayo-Luján *et al.* 2018).

En general, los residuos de la cáscara representan aproximadamente entre el 45 y 60% del peso total de la fruta (Delfin, López y Mondragón 2016) y en ocasiones puede llegar a un 70% según el método de procesamiento (Zema *et al.*, 2018). La composición química corresponde a 16.90% de azúcar, 3.75% almidón, 9.21% celulosa, 10.50% hemicelulosa, 0.85% lignina, 42.50% pectinas, 3.50% cenizas, 6.50% de proteína y 4.80% de aceite esencial (Ramírez, Mosquera, Ochoa, y Ayala, 2016).

Caracterización energética

La caracterización energética de residuos agrícolas de cultivo del naranjo se presenta en el Tabla 9. Los valores del carbono fijo de las hojas son similares a los presentados por García *et al.* (2014) with properties varying depending on its origin or the geographical region where it is obtained. Because of that, the development of predictive equations which are specific for the characteristics of certain regions' biomass is recommended. In this work, some correlations were obtained to relate the higher heating value (HHV, donde las hojas y podas de naranjo presentaron valores de contenido de humedad de 9.2%; de cenizas de 15.4%; material volátil de 73.2%, carbono fijo de 11.4% y poder calorífico superior de 16.17 MJ/kg. Por otra parte, Gonzalez y Montes (2019) reportan para la cáscara de naranja material volátil de 71.08%, cenizas de 4.02%, carbono fijo de 24.86% y poder calorífico superior de 19.34 MJ/kg.

Tabla 9. Contenido de humedad, material volátil, cenizas, carbono fijo y poder calorífico de hojas, ramas y fuste de naranja.

Descripción de la biomasa	Contenido de humedad (%)	Material volátil (%)	Contenido de cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico (MJ/kg)
Hojas	4.38	3.46	50.92	41.24	23.30
Ramas	4.16	3.53	49.79	42.52	23.57
Fuste	8.67	3.53	49.94	37.87	21.95

Fuente: Carrillo-Parra *et al.* (2019).

González y Montes (2019) recomiendan las semillas de naranja para procesos de combustión donde se requiera mayor estabilidad de la llama y baja temperatura de ignición del material combustible. Adicionalmente, establecen que estos residuos se pueden utilizar para procesos de pirólisis al presentar alto contenido de material volátil e hidrógeno. Mientras que la cáscara de naranja es recomendada en procesos de combustión prolongada por presentar un bajo índice de combustibilidad y baja relación atómica H/C.

ALGODÓN

Nombre científico: *Gossypium hirsutum* L.

Descripción

La planta posee un tallo erecto y con ramificación regular, las hojas son pecioladas, de un verde intenso, grandes y con los márgenes lobulados; están provistas de brácteas. Las hojas son dialipétalas, grandes, solitarias y penduladas. La corola está formada por un conjunto de estambres que rodean el pistilo. Algunas flores abren antes de la fecundación, produciéndose semillas híbridas (Retes López, Moreno Medina, Denogean Ballesteros, Martín Rivera, y Ibarra Flores, 2015).

El fruto es una cápsula de (2.0-)4.0-6.0 cm de largo, anchamente ovoides o subglobosas, glabras, con tres a cinco carpelos que tienen seis a diez semillas cada uno. La cápsula presenta dehiscencia loculicida. El crecimiento y el desarrollo del fruto, comienza inmediatamente después de la fertilización, aunque el período más rápido del crecimiento se presenta después de los 7-18 días, aproximadamente. Durante el desarrollo, las cápsulas son esféricas a oviforme y pálido verdosas. Las células epidérmicas de las semillas constituyen la fibra llamada algodón (Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismo Genéticamente Modificados [CIBIOGEM]-Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO] 2012).

La germinación se produce cuando se alcanza una temperatura superior a 14 °C, siendo el óptimo de germinación 20 °C; para su floración se necesita una temperatura promedio de 20 a 30 °C, y para la maduración de la cápsula, entre 27 y 30 °C. Se trata de un cultivo exigente en agua, pues la planta tiene mucha cantidad de hojas provistas de estomas por las que transpira cuando hay exceso de calor; los riegos deben aplicarse en todo el desarrollo de la planta. Requiere suelos profundos y permeables, característicos de los arcillosos (Martínez, 2012; Vites y Eduardo, 2012).

Preferencia de consumo

El cultivo del algodón va encaminado hacia el consumo de la fibra textil, donde la industria se divide en producción de fibra, de hiladura y textil; adicionalmente, se obtiene la semilla que se utiliza para la producción de aceite y para consumo forrajero.

Origen

El algodón es la planta textil de fibra suave más importante en el mundo, y su cultivo es de los más antiguos. Fue el primer textil en India, los primeros escritos del algodón son textos hindúes, himnos que datan 1,500 años a.C. y libros religiosos que datan de 800 a.C.

Las especies cultivadas, *Gossypium hirsutum* L. (AD1) y *G. barbadense* L. (AD2) se originaron en el Nuevo Mundo a partir de la hibridación transoceánica hace 1 a 1.5 millones de años de una especie africana ancestral similar a *Gossypium herbaceum* o *Gossypium arboreum*, con especies similares al genoma *Gossypium raimondii* (D5). Esto divergió en cinco especies de algodón, de ellas, *G. hirsutum* y *G. barbadense* evolucionaron independientemente y fueron domesticadas en diversas regiones geográficas (Bonilla-Revelo, Campos y Vásquez et al. 2009).

Formas de plantación

Las condiciones mínimas para sembrar incluyen una temperatura del suelo de 18 °C a una profundidad de 4-5 cm, a media mañana (9,00 a 10,00 ha) durante cinco días consecutivos, y un pronóstico favorable en los 10 días posteriores a la siembra (Mondino 2018). Se desarrolla en un terreno preparado y desprovisto de malas hierbas, se construye un perfil con unas crestas de valles sucesivos que permiten evitar el encharcamiento que pudieran ocasionar las lluvias. La siembra es muy delicada y de ella depende la germinación de las semillas. Se realiza en primavera y cuando el terreno alcance una temperatura de 14 a 16 °C. Sin embargo, uno de los momentos más críticos para la germinación del algodón es la temperatura mínima entre el momento de la siembra y los primeros cinco días posteriores al inicio del proceso de germinación (Hake, McCarty, Hopper, y Jividen, 1990). El marco de plantación cuando se realiza una recolección mecánica es de 0.95 m entre hileras y de 0.75 a 0.80 m para recolección manual.

El desarrollo del ciclo vegetativo de la planta se prolonga hasta ya entrado el mes de octubre. Las formas de siembra más utilizadas son:

- a. Siembra a campo libre. Este tipo de siembra es muy utilizado en zonas de regadío y de secano. Se utilizan sembradoras de chorrillo para la siembra mecanizada. Las dosis de siembra son de 8 a 10 unidades por golpe. Las semillas van pasando por las perforaciones de los discos de la sembradora, y conforme avanza la sembradora se van distribuyendo en hilera las semillas a lo largo del terreno a distancias exactas unas de otras. Se aconseja que las semillas estén cubiertas por una capa de tierra de 3 a 4 cm de espesor para que sea más fácil la germinación. De esta forma los cotiledones podrán desarrollarse y emerger al exterior del terreno.
- b. Siembra con acolchado de plástico. Es una técnica muy extendida y consiste en colocar unos plásticos en la superficie del terreno mediante una maquinaria muy completa. Esta maquinaria consiste en una sembradora neumática la cual aplica los insecticidas de suelo, los abonos y la colocación de una lámina de plástico. La técnica del acolchado consiste en que la línea de siembra quede centrada en la lámina de plástico. Se deben de realizar una serie de perforaciones en el plástico para que la planta salga por ahí. La película de plástico sirve como cámara protectora de la planta. Si existe condensación de vapor las temperaturas no son muy elevadas, por lo que no se debería perforar los plásticos. Para evitar las altas temperaturas se debe perforar el plástico, pues las altas temperaturas producirán quemaduras en las plantas.

Cuando las plantas de algodón alcanzan un tamaño de 5 a 10 cm de altura se procede al aclareo. En él se pretende eliminar un número concreto de plantas que interfieren unas con otras dejando de este modo unas 10 plantas por metro lineal, es decir, una plantación de 100,000 plantas/ha. Es una operación que se realiza a mano por lo tanto supone un costo en mano de obra (Frías 2012; Vites y Eduardo 2012).

Superficie, producción anual y estados que lo cultivan en México

En el año 2014, se cultivaron alrededor de 184,000 ha (15,000 ha menos que en 2011). Los principales productores fueron los estados de Chihuahua (68.9%), Baja California (15.6%), Coahuila (8.6%), Sonora (3.1%), Durango (2.2%), Tamaulipas (1.4%) y

Sinaloa (0.1%). Los tres primeros estados suman 93.2% de la producción total de algodón en el país y contribuyen con 92.9% del valor de la producción (SAGARPA Y SIAP 2015).

Para el año 2015, México se convirtió en el 11° productor mundial de algodón con 241 Mt. Asimismo, cifras de SAGARPA y SIAP (2015), señalan que en 2014, la producción nacional de hueso de algodón registró 861 530 t, lo que significa, según la fuente, que una de cada mil toneladas de algodón disponible en el mundo se cultiva en este país. Además, la participación nacional en la producción agroindustrial es de 1.4%

Chihuahua, Baja California y Coahuila, son los estados que registraron mayor crecimiento en su producción por el aumento en la superficie cultivada; aunque, Durango es la entidad que presentó el mayor rendimiento con 4.94 t/ha en 2014. Cabe señalar que en esta región se producen hasta 7 pacas/ha (una paca equivale a 480 lb alrededor de 217.7 kg de fibra) (CIBIOGEM-CONABIO 2017.; SAGARPA y SIAP 2015; Solleiro-Rebolledo y Mejía-Chávez 2016).

Producción de residuos

La cantidad y composición de los residuos en la desmontadora una vez cosechado el algodón, depende en gran medida del método de recolección y de la variedad. Pero puede llegar hasta el 10% del total. Si esta es manual los residuos son básicamente hojas y fibras, mientras que si es mecanizada los residuos contienen también ramas, cáscaras, etc. Estos residuos componen una buena composta e incluso en algunos países se está investigando su uso en la producción de energía (Pedreño, Herrero, Lucas y Beneyto, 1995).

Caracterización energética

Los residuos agrícolas de algodón pueden ser una fuente importante de energía, según lo demostró Blasco (2018). Este autor presenta las características energéticas de residuos de la cosecha de algodón con contenido de humedad de 7.66%, material volátil de 91.43%, cenizas de 3.83% y carbono fijo de 4.72%, mientras que el poder calorífico es de 19.62 MJ/kg. Por otra parte, Gravalos *et al.* (2016) reportaron valores de poder calorífico de tallos de la planta, yema terminal, ramas y hojas de 17.73, 16.39, 17.37 y 16.06 MJ/kg, respectivamente, mientras que los pélets elaborados de estos residuos presentaron un poder calorífico de 16.99 MJ/kg y contenido de cenizas de 7.46%. En un ensayo de pirólisis rápida, da Silva (2019) encontró un contenido de humedad de 7.30%, material volátil de 73.15%, cenizas de 8.22% y carbono fijo de 12.85%, mientras que el poder calorífico fue de 16.95 MJ/kg.

Por su parte, He, Uchimiya y Guo (2016) concluyen que todos los tipos de biomasa de algodón y los bioproductos, desde el tallo hasta la harina de la semilla presentan buenas posibilidades para su uso energético. No obstante a lo anterior, consideran que el biocarbón ha mostrando una aplicación prometedora en la fertilización del suelo, el secuestro de carbono y el remediación.

NUEZ

Nombre científico: *Carya illinoensis* L.

Descripción

Las nueces son de gran importancia en la vida humana, tienen una alta capacidad de nutrición debido a alto contenido de ácidos grasos insaturados, proteínas digeribles y fibra dietética. Convencionalmente, diferentes partes de nogales y frutos se utilizan para diversos propósitos en el mundo (Ogutcu y Yilmaz, 2017). La nuez pecanera, fruto del nogal pecanero de origen americano, nativo del norte de México y sur de Estados Unidos, es un árbol caducifolio monoico que puede medir 30 m de altura (Figura 10). El nogal presenta una madera semipesada de buena calidad. Las hojas son compuestas, dispuestas en forma alternada, imparipinadas, teniendo de 10 a 17 folíolos de forma oblongo-lanceolada, glabros y de borde aserrado. Presenta una floración diclino-monoica con dicogamia, es decir, que las flores femeninas y masculinas de una misma variedad y dispuestas sobre un mismo pie no maduran al mismo tiempo (Frusso 2018).



Figura 10. Huertas de nogal en Linares, Nuevo León, México.

Para el desarrollo de la planta deben evitarse lugares cuyas temperaturas primaverales desciendan menos de 1°C, ya que puede ocasionar daños por heladas en las inflorescencias masculinas en los brotes nuevos de los pequeños frutos. Por otra parte, si se presentan temperaturas mayores a 38°C acompañadas de baja humedad es posible que se produzcan quemaduras por el sol en las nueces más expuestas. Prefiere los suelos con textura media pesada y pH de 6.5 a 7.5. La temperatura óptima para su desarrollo es de 19 a 29 °C, y necesita una precipitación media anual de 0 a 800 mm (del Barrio y Martín 2011).

El fruto es grande con mesocarpio carnoso y endocarpio duro arrugado en dos valvas color café con un interior dividido incompletamente en dos o cuatro celdas; la semilla tiene dos o cuatro lóbulos y muchos hoyos. Sus frutos o semilla tienen cáscara dura y están provistos de una piel que se separa con facilidad de la pepita interior comestible (Velázquez, Colín y García, 2009).

Preferencia de consumo

La nuez se utiliza en la panadería, repostería y preparación de helados, postres, golosinas (garapiñados y palanquetas) y botanas (Posada, Terán, y Ramírez-Navas, 2011). Forma parte importante de los ingredientes para la preparación de moles regionales. Se usa también para hacer bebidas como licuados y pulque (Linares y Bye n.d.).

Origen

Se considera que el centro de distribución de la especie *Juglans regia* es Asia, de donde se difundió a Europa. El inicio de su cultivo se debió a los romanos, donde las legiones llevaron la planta a las regiones del Rin, en Alemania, así como a España, después pasó a Francia e Inglaterra. En América el nogal fue llevado a por los navegantes españoles, se difundió mayormente en California; en el hemisferio sur su introducción es de época más reciente (González et al., 2018). Por otra parte, el centro de origen del nogal pecanero (*Carya illinoensis*), está ubicado en el norte del estado de Coahuila, México. El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) desarrolló la variedad *norteña*, actualmente se tienen plantaciones en los estados de Sonora, Chihuahua, Nuevo León y Coahuila (Cuellar-Villarreal y Aguilar-Pérez 2018).

Formas de plantación

Se recomienda plantar árboles de 1.5 a 2.2 m de altura, con diámetro del tronco entre 2 y 2.5 cm. Estos árboles deben adquirirse en viveros ya injertados. El diseño de plantación más común es el de marco real; en un trazo de 12 x 12 m incluye 69 árboles por hectárea. Los árboles deben trasplantarse en hoyos de 60 cm de diámetro y un metro de profundidad (SAGARPA, 2017e).

Superficie, producción anual y estados que lo cultivan en México

El cultivo de nuez mantiene una producción de 122,000 t anuales en México con una superficie total de más de 112,000 hectáreas. El valor de la producción se estima en más de 8,000 millones de pesos, lo que coloca a México como el segundo país productor a nivel mundial. En México, el estado de Chihuahua, es el mayor productor con 79,000 t, los municipios con mayor superficie plantada con nogales son Jiménez, Camargo, Allende, Buenaventura y Aldama (Reyes-Vázquez y Urrea-López 2016).

En el año 2015, México se convirtió en el principal exportador de nuez pecanera con 22,738 t, lo que representó el 56% del volumen comercializado a nivel internacional. Se estima que se producen cada año 40,824 t de nuez pecanera, que equivale al 40.1% de lo que se cultiva en el mundo (SAGARPA, 2017f).

De acuerdo a los Servicios de Información Agroalimentaria y Pesquera (AGROSINTESIS 2017), la superficie utilizada para este cultivo fue de 113 mil hectáreas y se produjeron 123,000 t. En el 2017, la producción de nuez en México registró un aumento de 83% (SAGARPA, 2017f). Las entidades productoras de nuez en el país fueron Chihuahua, con 45.6%; Sonora, 25.4%; Coahuila, 12.5%; Nuevo León, 7.6% e Hidalgo, 3.8%. Estos estados aportaron el 95% de la producción nacional reportada, lo que representa un volumen de 36,679 t.

Producción de residuos

En México, el 95% de la cáscara de nuez se desecha, lo que provoca un alto volumen de basura. Se estima que 45–50% del peso total del fruto es cáscara, el residuo queda expuesta a cielo abierto resultando en un contaminante potencial. Si no se realizan prácticas de confinamiento, este subproducto representa una problemática que hasta el momento no se le ha encontrado una aplicación, a pesar de que tiene un alto contenido de compuestos bioactivos con valor en el mercado para fines alimentarios, cosméticos o farmacéuticos (Reyes-Vázquez y Urrea-López 2016). Los residuos de cáscara de nuez, de alguna manera pueden ser un problema y se usa escasamente como relleno de caminos y abrasivo para metales. En un estudio desarrollado por Fernández-Agulló, Castro-Iglesias, Freire y González-Álvarez (2020), encontraron que los residuos de nogal procedentes del mantenimiento forestal y del procesamiento de la madera: virutas, cortes con bordes y desechos de poda, podrían constituir una buena fuente de compuestos fenólicos, incluyendo fenólico ácidos y flavonoides, que podrían utilizarse en diferentes aplicaciones que hacen uso de su capacidad antioxidante.

Caracterización energética

Las características energéticas de briquetas elaboradas a partir de residuos agroindustriales de la nuez se presentan en el Tabla 10. Algunos valores son contrastantes a los reportados por Demirbas (2006) quien presenta un valor de material volátil de 59.3% y carbono fijo de 37.9%, mientras que Kar (2011) al realizar pirólisis de la cáscara de nuez encontró un contenido de humedad de 7.71%, material volátil de 77.87%, cenizas de 0.94%, carbono fijo de 13.48%, mientras que el poder calorífico fue de 17.18 MJ/kg.

Tabla 10. Caracterización energética de cáscara de nuez.

Descripción de la biomasa	Contenido de humedad (%)	Material volátil (%)	Contenido de cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico (MJ/kg)
Cáscara de nuez	9.27	65.96	3.28	30.76	20.78

Fuente: (Lugo-Rodríguez, 2020).

Martina *et al.* (2018) elaboraron briquetas con una mezcla con cáscara de nuez (10.15%), grasa vacuna (65.81%) y hierba (24.04%), y calcularon un porcentaje de material volátil de 73.7%, carbono fijo de 22.2% y cenizas de 4.1%. Por otra parte, el poder calorífico superior fue de 21.37 MJ/kg. Los altos valores en el poder calorífico lo atribuyeron al porcentaje de grasa vacuna utilizada. En otro trabajo realizado por Tirado (2015), se elaboraron briquetas de cáscara de nuez a 500 kg/cm² de presión y temperatura de 70 °C. Se reportó un contenido de humedad de 11.1%, cenizas de 1.82% y poder calorífico de 15.51 MJ/kg. Estos autores concluyen que las briquetas elaboradas con cáscara de nuez tienen buena cohesión entre partículas y una buena resistencia mecánica, y no recomiendan la adición de sustancias aglutinantes como la que se muestra en la Figura 11.



Figura 11. Briqueta elaborada con cáscara de nuez. Fuente: Lugo-Rodríguez (2020).

MANZANO

Nombre científico: *Malus domestica*.

Descripción

El árbol de manzano se caracteriza por ser caducifolio, aunque en pocas ocasiones puede ser siempre verde; son árboles de una altura de 1.5 a 7 m (Figura 12). Presenta hojas ovaladas elípticas, lanceoladas, oblongas, lobuladas o aserradas. Las flores son de tonalidad entre blanco y rosa o carmín (Granges y Barahona 1985).



Figura 12. Árbol y poda de manzano.

Es resistente al frío y no necesita gran cantidad de calor y luz para su maduración. Sufre menos con el exceso de frío que con el de calor y prefiere los climas húmedos que los secos. Las flores y los frutos tiernos son muy sensibles a las heladas. Prefiere los suelos franco-arenosos con profundidad mínima de 50 cm, y pH de 5.5 a 6. La temperatura óptima para su desarrollo es de -10 a 10 °C durante el invierno, y de 15 a 30 °C durante el verano. Demanda una precipitación media anual de 1,000 a 1,500 mm (Ramírez-Legarreta, Jacobo-Cuéllar, Ávila-Marioni, y Parra-Quezada, 2006).

El fruto de estructura firme, carnosos, derivado del receptáculo de la flor. Difiere en cuanto a color, tamaño y sabor, y según la variedad. El color de la piel va desde verde claro hasta el rojo muy oscuro, casi negruzco. En cuanto a tamaño puede ser apenas un poco mayor que una cereza y casi tan grande como una toronja o un melón mediano.

Preferencia de consumo

El consumo de la manzana es el fruto, y se consume crudo en su mayor parte, cocinado en numerosos postres así como transformado industrialmente como jugo, sidra, néctares, yogurt, deshidratada, refrescos, vinagres y licores (Bacardí-Gascón Murillo-González y Jiménez-Cruz, 2006). La manzana es una fruta que presenta oferta todo el año, su cosecha es estacional, por lo que en esa época se comercializan las manzanas recién cosechadas. Sin embargo, en gran parte del año lo que se encuentra son frutas que han sido almacenadas en condiciones controladas de temperatura, humedad y composición de la atmósfera para que permanezca agradable para aumentar su oferta y abastecer al mercado todo el año. En las últimas etapas de este período comienza a verse problemas de calidad por el largo período de conservación (Comisión Administradora del Mercado Modelo [CAMM], 2017).

Origen

Este frutal es originario de Asia Occidental y se ha cultivado desde hace miles de años en Asia y Europa, y fue introducido a América por los colonizadores europeos. En el año 500 a.C. cuando Alejandro Magno conquistó Persia el cultivo se extendió a Grecia (Ferree y Warrington 2003). Desde hace años este frutal ha sido ampliamente estudiado, hay un gran número de variedades, y difícilmente existe un conocimiento total de las mismas; sin embargo se calcula que existen más de 7,500 variedades comerciales actualmente (Seipel, Pirovani, Güemes, Gariglio, y Piagentini, 2009).

Formas de plantación

Las variedades de manzano se multiplican asexualmente por injerto sobre portainjertos o patrones enanos o semienanos que se propagan por acodos. Por semilla no es recomendable porque no se garantiza la prevalencia de las características de las variedades. Es posible hacer el injerto inglés o de lengüeta en plantas de vivero, o de corona para el cambio de variedad en las huertas (SAGARPA, 2017g) (Figura 13).



Figura 13. Huertas de manzano en el municipio de Canatlán, Durango, México.

La producción se inicia al segundo o tercer año de la plantación, de acuerdo con la variedad y el portainjerto sobre la que esté injertado. La mayoría de las variedades requiere polinización de otra especie o variedad. A causa de su comportamiento agronómico (vigor, producción, período improductivo corto, buena producción en suelos de diferentes características, baja sensibilidad a enfermedades), el patrón M.9 y sus selecciones clonales son las más utilizadas en las modernas plantaciones de manzano (Bonany, Carbó, Casals, Iglesias y Montserrat, 2003). Sin embargo, el número de árboles por hectárea es el principal factor que determina el rendimiento en un huerto de manzano. A su vez, el número de árboles por hectárea depende principalmente del tamaño de los mismos. Para reducir ese tamaño, es necesario utilizar patrones de reducido vigor. Existen patrones que lo reducen hasta un tamaño considerado enanizante, como el que proporcionan los patrones M.9, B.9 ó G.30 (Manuel y Rafael 2005).

Superficie, producción anual y estados que lo cultivan en México

México es el decimotercer productor de manzana a nivel mundial. Pese a importantes incrementos en su productividad nacional promedio en 2003-2016, equivalentes al 44.65%, la producción de 716,931 t en 2016 cubrió únicamente 77.26% del consumo nacional (SAGARPA, 2017g).

México aporta 460,000 t/año; de este total en la región Noroeste del estado de Chihuahua, México; se produjeron alrededor de 409,778 t de manzana (SAGARPA, 2007). De este total, cerca de 145,000 t se comercializaron como manzana de desecho (Unión de Fruticultores del Estado de Chihuahua [UNIFRUT] 2007) citado por Díaz-Plascencia *et al.*, (2013). Chihuahua aportó 81.8% del volumen nacional recolectado, seguido por Durango y Puebla con 5.9% y 5.2%, respectivamente.

Producción de residuos

El desecho agroindustrial del manzano no es apto para consumo humano, y es utilizado en su mayoría en la industria de la extracción para la elaboración de jugo; proceso del cual se obtiene un residuo o subproducto conocido como bagazo de manzana o pomasa. Gran parte de este bagazo es utilizado inadecuadamente en la alimentación animal, y el resto junto con buena parte de manzana de desecho que se queda en la huerta sin utilización alguna, dan origen a un problema de contaminación del medio ambiente por su alta velocidad de putrefacción, con la consecuente pérdida de nutrientes y dinero para el productor (Rodríguez-Muela *et al.* 2010).

Se estima una producción de pomasa no es aprovechada de aproximadamente 32,000 t/año, se sub-utiliza en la alimentación animal (Díaz-Plascencia *et al.*, 2013). Por otra parte, no existe información disponible del volumen de residuos sólidos que se generan en México durante la poda y por reemplazo de árboles que reducen su producción al llegar a la madurez (Figura 14). Sin embargo, Prando *et al.*, (2016) cuantificaron los residuos de poda y la madera de los árboles eliminados en huertos de manzanas en la provincia del Tiro del Sur (norte de Italia), y concluyeron que se generan en promedio 1.15 t/ha en peso seco. Por otra parte, Nakomcic-Smaragdakis, Cepic y Dragutinovic (2016) encontraron una producción de residuos en la poda de manzana de 3.40 t/ha.



Figura 14. Residuos de la poda de manzana en el municipio de Canatlán, Durango, México.

Caracterización energética

Los valores de los análisis proximales de leña y poda de manzano se presentan en el Tabla 11. A excepción del porcentaje de cenizas, los valores del contenido de humedad, material volátil, carbono fijo y poder calorífico de la leña y poda de los árboles de manzano indican que estos residuos son adecuados para su uso en la combustión. En relación a lo anterior, Brand y Jacinto (2020) también señalan que los residuos de poda de manzano tienen gran potencial para ser utilizados como combustible en boilers y para la generación de energía. La Figura 15 muestra un árbol de manzano a remplazar y podas de manzano.

Tabla 11. Caracterización energética de residuos agrícolas de manzano.

Descripción de la biomasa	Contenido de humedad (%)	Material volátil (%)	Contenido de cenizas (%)	Carbono fijo (%)	Poder calorífico (MJ/kg)
Leña	5.58	82.74	2.12	15.14	19.59
Poda	5.14	80.41	2.46	16.46	19.65

Fuente: (Lerma, 2020).



Figura 15. A) Árbol de manzano a remplazar y B) Poda de manzano.

Por otra parte, la producción de pélets a partir de residuos de la poda de manzano, genera pélets homogéneos que se ajustan a lo solicitado por la norma ISO 17225-2 (International Organization for Standardization [ISO] 17225-2:2014, 2014) y pueden ser utilizados industrialmente. Para reducir el porcentaje de cenizas, Brand y Jacinto (2020) recomiendan mezclar estos residuos con aserrín de pino, lo que también incrementará la densidad energética y densidad a granel.

AGAVE

Nombre científico: *Agave spp.*

Descripción

El género agave se le ubica en la taxonomía clásica en la familia Amaryllidaceae, subfamilia Agavoideae (García-Herrera, Méndez-Gallegos, S. de J. y Talavera-Magaña, 2010) y presenta 275 especies. Pero, otros autores lo ubican dentro del orden Agavales y específicamente en la familia Agavaceae, en donde se incluye el género Agave. Las agaváceas habitan en diferentes altitudes, desde la costa hasta alturas cercanas a 3,000 msnm; prefieren los suelos esqueléticos o arenosos, principalmente calcáreos, también suelos derivados de rocas metamórficas o ígneas. Presentan adaptaciones para soportar prolongados períodos de sequía a través del control de la transpiración y las reservas de agua de sus tejidos foliares, caulinares y radiculares (Figura 16).



Figura 16. Planta de Agave en Iturbide, Nuevo León.

Suelen habitar en vegetaciones xeromórficas. Principalmente en el sur de los Estados Unidos de América y México están establecidos por factores climáticos y en otras áreas tropicales por factores edáficos (de Zayas, 1989).

En los últimos años estas plantas han recibido atención, debido a que en la materia seca de las hojas se presentan paredes celulares que contienen entre 3 y 15% de lignina y 68% de celulosa; por lo que esta baja concentración de lignina consume menos energía cuando es utilizada para producir biocombustibles (Zúñiga-Estrada, Rosales Robles, Yáñez-Morales, y Jacques-Hernández, 2018).

Por otro lado, el cultivo del agave es producido mayormente para el consumo humano en forma de bebida alcohólica conocida como tequila, bebida que es el resultado del cocimiento de la piña, el machacado, fermentado y destilado. El jugo natural, tiene altos contenidos de fructosa y otras propiedades vitamínicas, además de partículas grasas que le dan su distinguido sabor y olor. La diferencia entre esta bebida y otros mezcales radica en que se fabrica industrialmente, con normas de calidad, y tiene una denominación de origen (Morales-Rodríguez, 2008).

Preferencia de consumo

En México, las especies de importancia económica son *Agave tequilana* cultivado para la producción de tequila; *A. angustifolia*, *A. salmiana*, *A. americana* y *A. duranguensis* entre otras, usadas en la elaboración del mezcal. Las especies *A. fourcroydes* y *A. lechuguilla* se utilizan para obtener fibra.

Los principales usos que se le da a las especies de este género se presenta en el Tabla 12.

Tabla 12. Principales usos de las especies del género *Agave*.

Uso	Producto	Parte de la planta
Alimentación	Azúcar, guisos, dulce, envolver barbacoa, mixiotes, gusanos blancos y rojos, pan, tortillas.	Tallo (piña), flores y frutos (cápsulas frescas), escapo floral (quiote), hojas, cutícula del cogollo y hojas.
Bebida	Aguamiel, miel, atole de aguamiel, pulque, mezcal, tequila, sotol, bacanora, vinagre, jarabe.	Tallo (piña).
Agrícola	Cerca viva, control de erosión, formadora de suelo, abono orgánico.	Planta completa.
Forraje	Bovinos, caprinos, porcinos.	Hojas, escapos florales, flores y parte de la inflorescencia, bagazo.

Elaborado a partir de (García-Herrera, et al. 2010).

Origen

El origen y distribución de la familia Agavaceae presenta una disyunción geográfica tan notable que resulta difícil de explicar, existen géneros en América del Norte y en Japón y China, por lo que no es coincidente con una dispersión geográfica y hace remota la posible relación sobre bases geológicas (de Zayas, 1989).

En América, la familia Agavaceae se encuentra distribuida entre los 40 grados de latitud norte y los 20 grados de latitud sur, se presenta en el centro y suroeste de los Estados Unidos de América, México, Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Colombia, Venezuela, Guyana, Antillas Holandesas, Trinidad-Tobago, Antillas Menores, Antillas Mayores, Gran caimán y Bahamas (de Zayas, 1989).

Formas de plantación

El agave se siembra en hileras, el trazo se puede hacer con tractor, estacas y un hilo. Con el tractor se acuartela o únicamente se hace un surco a la distancia que se decidió separar las hileras, y posteriormente, con un hilo se marca la distancia a la que se quiere separar las plantas con el fin de establecer plantaciones rectas y equidistantes. Las estacas sirven para fijar el hilo o mecate que el plantador usa de guía para establecer el hijuelo. Algunos productores realizan plantaciones de acuerdo a la topografía del terreno, empleando el trazo de curvas de nivel para evitar pérdidas de suelo por erosión y tener una mejor distribución de la humedad. La plantación se realiza manualmente con un azadón de cabo corto. Posteriormente, se entierra tres cuartas partes de la piña y después se apisona la tierra alrededor de la planta, para que el viento no la tumbe (Arias-Moreno *et al.* 1991).

En el estado de Tamaulipas es común observar una gran diversidad de arreglos y densidades de población en las plantaciones, encontrándose variaciones entre 2,222 y 6,250 plantas por hectárea. Se pueden encontrar hileras anchas, con una separación entre hileras de 3 m y 1.50 m entre plantas; o hileras angostas, de 2.0 m y 0.80 m entre plantas. En terrenos con posibilidades de trabajarlos con maquinaria, es más adecuado establecer plantaciones con hileras simples separadas a 3.0 m y de 1.5 a 1.0 m de separación entre plantas, esto equivale a establecer densidades de 2,222 y 3,333 plantas por hectárea, respectivamente (Pérez y Rubio 2007).

Superficie, producción anual y estados que lo cultivan en México

De acuerdo con los registros de la SAGARPA, en 2011 existían 460 municipios con plantaciones de agave (mezcalero, bacanora, tequilero, maguey); sin embargo, en 2014 se redujo a 402 municipios. De este total, por lo menos 175 municipios tienen registros de producción de agave-mezcal, 181 se dedican al cultivo de agave-tequila, y 54 al *Agave tequilana* Weber (Gschaedler, 2017); con ello se preserva la identidad, ecosistema y biodiversidad regional.

En lo que se refiere al valor de la producción nacional, el agave concentró en 2014 aproximadamente 2.43% respecto del total de todos los productos agrícolas del país. Los estados de Jalisco, Guanajuato, Oaxaca, Michoacán y Guerrero acumularon 94.38% del total del valor de la producción del país, así como 88.48% del total de la producción nacional de la planta, con una superficie ocupada de 107, 246 hectáreas sembradas de las 120,340 sembradas en 2014 (SAGARPA, 2015b). Para el año 2016, la superficie sembrada de agave fue de 108,119.83 ha, la superficie cosechada fue de 21,731.41 ha y hubo una producción de 1,846,345 t, con un rendimiento de 84.96 t/ha (Vaca-Navarro *et al.*, 2019).

El rendimiento promedio del agave (en general) es de 43.81 t/ha, sobresaliendo el estado de Puebla (93.67 t/ha), Zacatecas (84.24 t/ha), Morelos (61.50 t/ha) y Jalisco (61 t/ha). En lo que respecta al agave-mezcal el rendimiento promedio oscila en 37.68 t/ha,

sobresaliendo Puebla (93.67 t/ha) y Oaxaca (46.86 t/ha) (Gschaedler, 2017, en Sandra Blas, Humberto-Thomé, Vizcarra-Bordi, y Espinoza-Ortega, 2019).

Producción de residuos

Las cifras que reporta la Cámara Nacional de la Industria Tequilera (Cámara Nacional de la Industria Tequilera [CNIT], 2015 en Torres 2016)2015, indican que la producción total de tequila, durante el 2014, fue de 242.4 millones de litros al 40% de Alc/Vol; esto implica aproximadamente 245 millones de kilogramos de bagazo y 1763 millones de litros de vinaza en el 2014 (Gschaedler, 2017 en Sandra Blas, Humberto-Thomé, Vizcarra-Bordi, y Espinoza-Ortega, (2019)). Este residuo representa aproximadamente el 40% del peso total de agave procesado y actualmente se generan alrededor de 105 000 t/año, de los cuales la mayoría se utiliza como composta (Saucedo-Luna, Castro-Montoya, Martínez-Pacheco, y Campos-García, 2010), (Figura 17).



Figura 17. Residuos de *Agave durangensis* en el municipio de Durango, Durango. México.

Caracterización energética

El uso de los residuos de agave como forraje, no es adecuado por su bajo nivel nutricional y poca homogeneidad, por lo que Valdez-Vazquez *et al.* (2010) sugieren su transformación en algún tipo de biocombustible. Lo anterior se refuerza por las características energéticas del bagazo de *Agave durangensis* que se presentan en el Tabla 13. Otros estudios han reportado los resultados de análisis inmediatos y del poder calorífico superior de la biomasa de las especies *Agave salmiana* y *A. tequilana*. En los cuales, el contenido de humedad en estos trabajos se estableció en 2.68%, el material volátil en el rango de 71.0 a 78.1%, el contenido de cenizas de 7.4 a 11.41%, y el carbono fijo de 7.16 a 14.90%, mientras que el poder calorífico fue de 15.43 a 16.35 MJ/kg (Linan-Montes *et al.*, 2014; Parascanu, Sandoval-Salas, Soreanu, Valverde, y Sanchez-Silva, 2017).

Tabla 13. Caracterización energética de bagazo de *Agave durangensis*.

	Característica	Unidad	Promedio	Desviación estándar
Análisis proximales	Contenido de humedad	%	6.54	0.12
	Material volátil	%	82.28	1.09
	Cenizas	%	10.57	1.14
	Carbono fijo	%	7.16	1.12
Características energéticas	Poder calorífico superior	MJ/kg	14.50	0.52

Fuente: (Blancarte 2020).

Los autores antes mencionados concluyen que los residuos de esta especie pueden ser utilizados como fuente de energía alternativa mediante combustión y pirólisis, pero recomiendan colectar las cenizas de los sitios de combustión. Adicionalmente, Honorato-Salazar y Sadhukhan (2020) estiman que el potencial energético anual en México del bagazo procedente del tequila y de mezcal es de 2.06 y 0.46 PJ, respectivamente.

3. Referencias

- Acebo-Muñiz, G. (2018). *Evaluación del comportamiento agro morfológico en cultivo establecido de Citrus sinensis (naranja) a la aplicación de fertilización edáfica y foliar*. Tesis de Licenciatura, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador.
- Adi, D.D., Oduro, I., & Simpson, B.K. (2019). Biological and Microbial Technologies for the Transformation of Fruits and Vegetable Wastes. *Byproducts from Agriculture and Fisheries: Adding Value for Food, Feed, Pharma, and Fuels*, 403–420. <https://doi.org/10.1002/9781119383956.ch17>
- AGROSINTESIS. (2020). Se incrementa la producción de nuez en México. Recuperado de <https://www.agrosintesis.com/se-incrementa-la-produccion-nuez-mexico>. Consultado 26 de febrero 2020.
- Agrotendencia. (2020). Agrotendencia, Televisión que siembra un continente. Recuperado de <https://agrotendencia.tv/agropedia/nos/>. Consultado 13 de Marzo 2020).
- Aguilar-Gallegos, N., Martínez-González, E.G., Aguilar-Ávila, J., Santoyo-Cortés, H., Muñoz-Rodríguez, M., & García-Sánchez, E.I. (2016). Análisis de redes sociales para catalizar la innovación agrícola: de los vínculos directos a la integración y radialidad. *Estudios Gerenciales*, 32(140), 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2016.06.006>
- Aguilar, L.J.M.E.A., Mendoza, M., Pedro, A., & Becerraasesor, A. (2011). *Crecimiento y productividad en la asociación agroforestal 'cedro-limón-chaya' en respuesta a la densidad de plantación*. El Colegio de la Frontera Sur. (Reporte técnico 634.99097267 A3).
- Almaguer-Vargas, G., & Ayala-Garay, A.V. (2014). Adopción de innovaciones en limón Persa (*Citrus latifolia* tan.) en Tlapacoyan, Veracruz: Uso de bitácora. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 20(1), 89–100. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2010.10.076>

- Araiza-Flores, R., & Cruzaley-Sarabia, R. (2003). *Tecnologías en la producción de limón mexicano en Guerrero*. Folleto técnico No. 5. SAGARPA. INIFAP. Chilpancingo, Guerrero. 2003.
- Arias-Moreno, C., Martínez-Castro, A., & Villanueva Díaz, J. (1991). *Establecimiento y manejo de maguay para obtención de forraje*.
- Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria en México [ASERCA] (2002). Comercialización de los productos agropecuarios: limón Mexicano. *Apoyos y servicios a la comercialización agropecuaria en México*, 101, 1–30.
- Aznar, S.J. (1999). *Reconocimiento de variedades de cítricos en campo*.
- Bacardí-Gascón M., de J Murillo-González, M., & Jiménez-Cruz, A. (2006). Efectividad a largo plazo de la manzana de la salud sobre el diseño de dietas. *Revista Biomédica*, 17(1), 17–23. <https://doi.org/10.32776/revbiomed.v17i1.435>
- Franco B.P.N. (2010). *Cosecha del fruto de la palma de aceite*. Fedepabna-Fondo de Fomento Palmero. ISBN t78-951-8616-1 J-I C. 85 p.
- Blancarte, C.E. (2020). *Evaluación del uso energético de residuos agroindustriales y pélets de Agave durangensis Gentry en el estado de Durango*. Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de el Salto, Durango, México.
- Blasco, S.C. (2018). *Evaluación de los recursos agrícolas para su valorización energética en calderas Spouted Bed Reactors*. Recuperado de <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/98729>. Consultado el 10 de abril del 2020.
- Bonany, J., Carbó, J., Casals, M., Iglesias, I., & Montserrat, R. (2003). Performance of Some Clonal Apple Rootstocks in Girona and Leida (Catalonia, NESpain) with Special Reference to Fruit Quality. *Acta Horticultura*, (658), 333–339. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.658.48>
- Bonilla-Revelo, S.G., Campos, E.H.O., & Vásquez, V.L.E. (2009). *Propuesta de un plan de mercadeo para mejorar el posicionamiento del algodón absorbente en la industria salvadoreña. Caso ilustrativo*. Universidad de El Salvador.
- Borrego, C.A. (2020). Cultivo de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) Recuperado de https://www.infoagro.com/herbaceos/oleaginosas/palma_aceite3.htm Consultado el 10 de abril del 2020.
- Brand, M.A., & Jacinto, R.C. (2020). Apple pruning residues: Potential for burning in boiler systems and pellet production. *Renewable Energy*, 152, 458–466. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.037>
- Brunerová, A., Müller, M., Šleger, V., Ambarita, H., & Valášek, P. (2018). Bio-pellet fuel from oil palm empty fruit bunches (EFB): Using european standards for quality testing. *Sustainability*, 10(12), 4443. <https://doi.org/10.3390/su10124443>
- Camacho, C., Bautista, L., León, Y., & Antonio, M. (2017). Propuesta comercial para el aprovechamiento de mango desechado en el estado de Guerrero. *Revista de Sistemas Experimentales*, 4(13), 50–58.
- Carrillo-Nieves, D., Alanís, M.J.R., de la Cruz Quiroz, R., Ruiz, H.A., Iqbal, H.M.N., & Parra-Saldívar, R. (2019). Current status and future trends of bioethanol production from agro-industrial wastes in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.031>

- Carrillo-Parra, A., Prieto-Ruiz, J.Á., Goche-Telles, J.R., Montiel-Antuna, E., Dominguez-Calleros, P.A., & Chávez-Simental, J.A. (2019). Potencial bioenergético de biomasa residual de la poda de *Citrus limon* y *C. Sinensis*. *Póster presentado en el Congreso Mexicano de Recursos Forestales de la Sociedad Mexicana de Manejadores de Recursos Forestales*. 6 al 9 de Noviembre, Durango, Durango. México.
- Cisneros, E.S., & Montaña, M. (2000). *Estudio económico-ambiental del sistema de cultivo del mango en la región de la sub-cuenca del río Daule*. Tesis de Licenciatura, Instituto de Ciencias Humanísticas y Económicas, Guayaquil, Ecuador.
- Comisión Administradora del Mercado Modelo [CAMM] (2017). Recuperado de <http://www.mercadomodelo.net/quienessomos>. Consultado el 8 de febrero del 2020.
- Comisión Intersecretarial de Bioseguridad de los Organismo Genéticamente Modificados [CIBIOGEM]-Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO] (2012). Sistema de Información de Organismos Vivos Modificados (SIOVM). Retrieved 10.01. 2012.
- Contreras-Trejo, J.C. (2018). *Elaboración de pelets de Elaeis guineensis Jacq utilizando aserrín de Pinus sp. como aditivo*. Tesis de Licenciatura, Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, México.
- Corley, R.H.V., & Tinker, P.B. (2009). *El origen y desarrollo de la industria de la palma de aceite*. (4a.ed) Bogotá: Fedepalma 2009.
- Cuellar-Villarreal, E.J., & Aguilar-Pérez, H. (2018). *NORTEÑA Nueva variedad de nogal pecanero*.
- Cury, K., Aguas, Y., Martinez, A., Olivero, R., & Ch, L.C. (2017). Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. *Revista Colombiana de Ciencia Animal-RECIA*, 122–132. <https://doi.org/10.24188/recia.v9.nS.2017.530>
- da Silva, J.E. (2019). *Resíduos culturais de algodão naturalmente colorido para produção de biocombustíveis e aromáticos renováveis*. Tesis de Doctorado, Universidad Federal do Rio Grande do Norte, Janeiro, Brasil.
- de Zayas, A.A. (1989). Distribución geográfica y posible origen de las Agavaceae. *Revista Del Jardín Botánico Nacional*, 10(1), 25–36.
- del Barrio, R.A., & Martín, D.M. (2011). Aptitud Agroclimática del valle inferior del río Negro para los cultivos de avellano y nogal. *Pilquen-Sección Agronomía*, 11(2).
- del Rosal, A., & Tapia-Ríos, J. (2003). *Problemática en la comercialización de naranja (Citrus sinensis) en el estado de Veracruz/Jesús Ángeles del Rosal*. (No. SB370. 07. A53 2003.).
- Delfín, K.C., López, A.C., & Mondragón, M.C. (2016). Subproductos obtenidos a partir de distintas cáscaras de fruta. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, 3(5).
- Demirbas, A. (2006). Effect of temperature on pyrolysis products from four nut shells. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 76(1), 285–289. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaap.2005.12.012>
- Díaz-Plascencia, D., Rodríguez-Muela, C., Mancillas-Flores, P., Corral, G., Salvador, F., Durán, L., & La, O. (2013). Producción de gas *in vitro* de una ración para vaca lechera suplementada con levaduras aisladas de subproductos de manzana. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 47(2), 165–169.

- Díaz, G.F., Rueda, G.Z., Mistretta, M.G., Peralta, F.L., Golato, M., & Paz, D. (2018). Estudio preliminar de la caracterización energética de la poda de limón en la provincia de Tucumán. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 94(2), 71–74.
- Espinoza-Zamora, A., Orozco-Benítez, G., Vázquez-López, Y., Romo-Rubio, J., Escalera-Valente, F., & Martínez-González, S. (2019). Una revisión sobre la pulpa de naranja: cantidad, composición y usos. *Abanico Agroforestal*, 1.
- Evans, E.A. (2009). Tendencias Recientes en la Producción, Comercio y Consumo de Mango en el Mundo y en los Estados Unidos. *EDIS*, 2009(1). <https://journals.flvc.org/edis/article/view/117664>.
- Fálder-Rivero, Á. (2003). Enciclopedia de los alimentos: Frutas. *Distribución y Consumo*, (69), 115–133. Recuperado de https://www.mercasa.es/media/publicaciones/108/1292519502_DYC_2003_70_75_96.pdf Consultado 11 de abril del 2020.
- Fernández-Agulló, A., Castro-Iglesias, A., Freire, M.S., & González-Álvarez, J. (2020). Optimization of the extraction of bioactive compounds from walnut (*Juglans major* 209 x *Juglans regia*) leaves: antioxidant capacity and phenolic profile. *Antioxidants*, 9(1), 18. <https://doi.org/10.3390/antiox9010018>
- Ferree, D.C., & Warrington, I.J. (2003). *Apples: botany, production, and uses*. Cambridge, MA: CABl. <https://doi.org/10.1079/9780851995922.0000>
- Figueiredo, M.T.D., Gomes, C.H.J., Rosa, Y.G., Leite, S.A., Isola, A., & Leite, B.S. (2017). Energetic potential and new materials production from lemon bagasse (*Citrus limonia* Osbeck). En *V Simpósio Internacional sobre gerenciamento de resíduos agropecuários e agroindustriais* (p. 4). Foz do Iguaçu. PR
- Food and Agriculture Organization [FAO]. (2018). FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>. Consultado 28 de marzo del 2020.
- Francis, J.K., Lowe, C.A., & Trabanino, S. (2000). *Bioecología de árboles nativos y exóticos de Puerto Rico y las Indias Occidentales*. Gen. Tech. Rep. IITF-15. Río Piedras, PR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, International Institute of Tropical Forestry. 582 p.
- Frusso, E.A. (2018). Características morfológicas y fenológicas del pecán, guía fenológica ampliada y resumida. Recuperada de https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_2018_caracteristicas_morfologicas_y_fenologicas_del_pecan_guia_fenologica_ampliada_y_resumida_0.pdf. Consultada el 10 de abril del 220.
- García-Herrera, E.J., Méndez-Gallegos, S. de J., & Talavera-Magaña, D. (2010). El género *Agave* spp. en México: principales usos de importancia socioeconómica y agroecológica. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 5, 109–129.
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A.G., & Bueno, J.L. (2014). Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. *Fuel*, 117, 1139–1147. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.049>
- Geilfus, I. (1989). *El árbol al servicio del agricultor. Manual de agroforestería para el desarrollo rural Vol. 2: Guía de especies*. Turrialba, Costarrica. Enda-Caribe. CATIE.

- Gonzalez, A.F.R., & Montes, C.F. (2019). Valorización de residuos de frutas para combustión y pirólisis. *Revista Politécnica*, 15(28), 42–53. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v15n28a4>
- González-López, R. (2014). Proceso de producción y manejo del cultivo del naranjo (*Citrus* sp.) en México.
- González M.K., Pot V.E., Hernández, O., Goergina, R., López M.J.T., Calderón, T., ... Rodríguez M.J.A. (2018). Frutos y frutas secas.
- Granges, E., & Barahona, E. (1985). *Guía del cultivo del manzano*. Quito, Ecuador: INIAP. 1985.
- Gravalos, I., Xyradakis, P., Kateris, D., Gialamas, T., Bartzialis, D. y Giannoulis, K. (2016). An experimental determination of gross calorific value of different agroforestry species and bio-based industry residues. *Natural Resources*, 7(1), 57–68. <https://doi.org/10.4236/nr.2016.71006>
- Gschaedler, A.C. (2017). Panorama del aprovechamiento de los Agaves en México. *Red Temática Mexicana Aprovechamiento Integral Sustentable y Biotecnología de Los Agaves. México*.
- Hake, K., McCarty, W., Hopper, N., & Jividen, G. (1990). Seed quality and germination. *Cotton Physiology Today, Technical*, 4.
- He, Z., Uchimiya, S.M., & Guo, M. (2016). Production and characterization of biochar from agricultural by-products: Overview and use of cotton biomass residues. *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers*, (sssaspepub63), 63–86. <https://doi.org/10.2136/sssaspepub63.2014.0037.5>
- Honorato-Salazar, J.A., & Sadhukhan, J. (2020). Annual biomass variation of agriculture crops and forestry residues, and seasonality of crop residues for energy production in Mexico. *Food and Bioproducts Processing*, 119, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.10.005>
- International Organization for Standardization [ISO] 17225-2:2014. (2014). Biocombustibles sólidos Especificaciones y clases de combustibles Parte 2: Clases de pélets de madera.
- Isaac-Márquez, R., Valladares, J.L.S., Spencer, A.E., Arcipreste, M.E.A., Aguilar, M.A.A., Márquez, A.P.I., & González, M.C.S. (2016). Impactos sociales y ambientales de la palma de aceite: perspectiva de los campesinos en Campeche, México. *Journal of Latin American Geography*, 123–146. <https://doi.org/10.1353/lag.2016.0023>
- Jones, G., Loeffler, D., Calkin, D., & Chung, W. (2010). Forest treatment residues for thermal energy compared with disposal by onsite burning: Emissions and energy return. *Biomass and Bioenergy*, 34(5), 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.016>
- Kar, Y. (2011). Co-pyrolysis of walnut shell and tar sand in a fixed-bed reactor. *Bioresource Technology*, 102(20), 9800–9805. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.08.022>
- Kirkaldy, J.L.R., & Sutanto, J.B. (1976). Possible utilisation of by-products from oil palm industry. *Planter*, 52(601), 118–126.
- Lerma, A. (2020). *Caracterización, física, química y energética de pélets de residuos agroindustriales del cultivo de manzano*. Tesis de Licenciatura en proceso, Universidad Juárez del Estado de Durango. Durango, México.

- Linan-Montes, A., De la Parra-Arciniega, S.M., Garza-González, M.T., García-Reyes, R.B., Soto-Regalado, E., & Cerino-Córdova, F.J. (2014). Characterization and thermal analysis of agave bagasse and malt spent grain. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 115(1), 751–758. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3321-y>
- Linares, E., & Bye, R. (n.d.). principales ingredientes botánicos. *El Mole En La Ruta de Los Dioses*. Recuperado de <https://www.cultura.gob.mx/turismocultural/cuadernos/pdf12/articulo3.pdf>. Consultado 10 de abril del 2020.
- Liu, W., Gu, M., Hu, G., Li, C., Liao, H., Tang, L., & Shapira, P. (2014). Profile of developments in biomass-based bioenergy research: a 20-year perspective. *Scientometrics*, 99(2), 507–521. <https://doi.org/10.1007/s11192-013-1152-z>
- Loh, S.K. (2017). The potential of the Malaysian oil palm biomass as a renewable energy source. *Energy Conversion and Management*, 141, 285–298. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.08.081>
- Lugo-Rodríguez, M.S. (2020). *Potencial energético de briquetas elaboradas de tres residuos agroindustriales de Rodeo, Durango, México*. Tesis de Licenciatura en proceso. Universidad Tecnológica de Rodeo. Rodeo, México.
- Manuel, G.P.V., & Rafael, P.Q. (2005). Descripción de portainjertos de manzano y diseño de plantaciones con portainjertos clonales.
- Martina, P.E., Aeberhard, M.R., Borchichi, S., Arias, S., Corace, J.J., & Azuaga, A.L. (2018). Caracterización energética de briquetas fabricadas con diferentes mezclas de biomasa residual. *Acta de La XLI Reunión de Trabajo de La Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*, 6, 06.53-06.62. Recuperado de <http://www.exporenovables.com.ar/2018/descargas/actas/asades-tema-6-53.pdf>
- Martínez, F.J.C. (2012). Propagación y técnicas de cultivo del Algodón (*Gossypium herbaceum*). *Revista Vinculando*. Recuperado de <http://vinculando.org/mercado/agroindustria/propagacion-y-tecnicas-de-cultivo-del-algodon-gossypium-herbaceum.html>. Consultado 11 de marzo del 2020.
- Martínez, S., Teresa, M., Sánchez H.L.M., Torres G.G. y García P.J.D. (2012). Red de valor del mago y sus desechos con base en las propiedades nutricionales y funcionales.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83, 37–46. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3)
- Mejías-Brizuela, N., Orozco-Guillén, E., & Galáan-Hernández, N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(6), 27–41.
- Mondino M. (2018). Picudo del Algodonero: propuestas de fechas de siembra, destrucción de rastrojos y vacío sanitario para Santiago del Estero. Recuperado de <https://inta.gob.ar/documentos/picudo-del-algodonero-propuestas-de-fechas-de-siembra-destruccion-de-rastrojos-y-vacio-sanitario-para-santiago-del-estero>. Consultado el 10 de abril del 2020.
- Moncayo L., M.D.R., Reyes M.A., & Carrillo I.M.L. (2018). Aprovechamiento de subproductos agronómicos. *Revista Académica de Investigación, Tlatemoani*. Recuperado de <https://www.eumed.net/rev/tlatemoani/29/subproductos-agronomicos.html>. Consultado el 10 de abril del 2020.

- Moradi, A., Teh, C.B.S., Goh, K.J., Husni, M.H.A., & Ishak, C.F. (2014). Decomposition and nutrient release temporal pattern of oil palm residues. *Annals of Applied Biology*, 164(2), 208–219. <https://doi.org/10.1111/aab.12094>
- Morales-Rodríguez, R. (2008). *Ingeniería básica de una planta para la industria del mezcal en Mitla, Tlaxiaco, Oaxaca*. Tesis de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, Sta. Cruz Xoxocotlán, México.
- Nakomcic-Smaragdakis, B., Cepic, Z., & Dragutinovic, N. (2016). Analysis of solid biomass energy potential in Autonomous Province of Vojvodina. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 186–191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.118>
- Noguera R.L., Corzo R.L.J., & Vázquez L.P. (2014). Utilización de un desecho de la producción de jugo de limón persa (*Citrus Latifolia*) en la obtención de pectina cítrica. *XXVI Reunión Científica Tecnológica, Forestal y Agropecuaria Tabasco 2014*, 749.
- Ogutcu, M., & Yilmaz, E. (2017). Influence of different antioxidants and pack materials on oxidative stability of cold pressed poppy seed oil. *Rivista italiana delle sostanze grasse*, 94(1), 45–52.
- Onoja, E., Chandren, S., Razak, F.I.A., Mahat, N.A., & Wahab, R.A. (2018). Oil palm (*Elaeis guineensis*) biomass in Malaysia: the present and future prospects. *Waste and Biomass Valorization*, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0258-1>
- Parascanu, M.M., Sandoval-Salas, F., Soreanu, G., Valverde, J.L., & Sanchez-Silva, L. (2017). Valorization of Mexican biomasses through pyrolysis, combustion and gasification processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 509–522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.079>
- Patil, J.R., Murthy, C.K.N., Jayaprakasha, G.K., Chetti, M.B., & Patil, B.S. (2009). Bioactive compounds from Mexican lime (*Citrus aurantifolia*) juice induce apoptosis in human pancreatic cells. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(22), 10933–10942. <https://doi.org/10.1021/jf901718u>
- Pedreño, J.N., Herrero, J.M., Lucas, I.G., & Beneyto, J.M. (1995). *Residuos orgánicos y agricultura*. (pp. 1-155). Universidad de Alicante, Alicante, España.
- Perea-Moreno, A.J., Perea-Moreno, M.-Á., Dorado, M.P., & Manzano-Agugliaro, F. (2018). Mango stone properties as biofuel and its potential for reducing CO₂ emissions. *Journal of Cleaner Production*, 190, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.147>
- Pérez, J.F., & Rubio, C. (2007). Tecnología de manejo y control de plagas del agave. In J.F. Pérez & J.I. del Real (Eds.), *Conocimiento y practicas agronómicas para la producción de Agave tequilana Weber en zona de Denominación de Origen de Tequila* (pp. 135–168). INIFAP.
- Posada, K., Terán, D.M., & Ramírez-Navas, J.S. (2011). Empleo de lactosuero y sus componentes en la elaboración de postres y productos de confitería. *La Alimentación Latinoamericana*, 292, 66–75.
- Prando, D., Boschiero, M., Campana, D., Gallo, R., Vakalis, S., Baratieri, M., ... Zerbe, S. (2016). Assessment of different feedstocks in South Tyrol (Northern Italy): Energy potential and suitability for domestic pellet boilers. *Biomass and Bioenergy*, 90, 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.03.039>

- Puente Huera, C.J. (2011). *Determinación de las características físicas y químicas del limón sutil (Citrus aurantifolia Swingle)*. Tesis de Licenciatura, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador.
- Quintana, G.C., Arroyave, M.S., & Suárez, D.E. (2008). Obtención de pulpa a partir de los residuos de palma africana pretratados con steam explosión. En *V Congreso Iberoamericano De Investigación en Celulosa y Papel*. Guadalajara, Jalisco, México.
- Quintero O.C.A., & Quiroga V.L.F. (2017). *Estimación del Potencial Energético a partir de la Biomasa Primaria Agrícola en el Departamento de Cundinamarca*. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. Recuperado de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5703/1/QuirogaVelascoLuisFelipe2017.pdf>
- Ramírez-Legarreta, M.R., Jacobo-Cuéllar, J.L., Ávila-Marioni, M.R., & Parra-Quezada, R.Á. (2006). Pérdidas de cosecha, eficiencia de producción y rentabilidad de huertos de manzano con diversos grados de tecnificación en Chihuahua, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(3), 215–222.
- Ramírez, Y., Mosquera, E., Ochoa, C., & Ayala, A. (2016). Evaluación de propiedades físico-químicas en secado de naranja (*Citrus sinensis*) mediante liofilización: influencia del espesor. *Agronomía Colombiana*, 340–342.
- Ramos-Novelo, J.A (2003). Riesgos y oportunidades de la red de valor naranja. Un enfoque competitivo. *FIRA Boletín Informativo (México)*. 35(320), 160p.
- Rengifo, C.E., & Rodríguez, C.L. (2012). *Elaboración de un producto con alta concentración de azúcar (bocadillo) a base de mango*. Tesis de Licenciatura, Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería, Santander de Quilichao, Colombia.
- Retes L.R., Moreno M.S., Denogean B.F., Martín R.M., & Ibarra F.F. (2015). Análisis de rentabilidad del cultivo de algodón en Sonora. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 36(1345-2016–104378), 1156–1166.
- Reyes-Vázquez, N.C., & Urrea-López, R. (2016). Retos y oportunidades para el aprovechamiento de la nuez pecanera en México. *Centro de Investigación y Asistencia En Tecnología y Diseño Del Estado de Jalisco, Guadalajara, México*.
- Rodríguez-Muela, C., Becerra-Bernal, A., Rodríguez-Ramírez, H.E., Díaz-Plascencia, D., Hernández-Gómez, C., Gutiérrez-Pima, F., Gallegos, A.M.A., Romero, V.A., & Lucero-Acosta, F. (2010). Valor nutricional de la manzarina, obtenida de subproductos de manzana para la alimentación animal. *TECNOCIENCIA*, IV(3).
- Rodríguez, T.V.A., Osuna, R.I., Amezcua, V.C., Salazar, L.J.A., & Sanchez H.L.M. (2015). Aprovechamiento de cáscaras de mango para la producción de β -1-4-endoglucanasa por *Aspergillus* sp: efecto de variables físico químicas y biológicas. *Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa*, 1(1).
- Rhoades, P.C. (2011). *Los cambios en la cadena de producción de la palma aceitera en el Pacífico costarricense: una historia económica, socioambiental y tecnocientífica, 1950-2007*. Sociedad Editora Alquimia 2000. San José, Costa Rica.
- Sadh, P.K., Duhan, S., & Duhan, J.S. (2018). Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review. *Bioresources and Bioprocessing*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0187-z>

- Sandra B.Y., Humberto-Thomé, O., Vizcarra-Bordi, I., & Espinoza-Ortega, A. (2019). Venta informal de pulque como estrategia de reproducción social. Evidencias del centro de México. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.11799/105956>. Consultado el 10 de abril del 2020.
- Santos-Villalobos, S. de los, Folter, S. de, Délano-Frier, J.P., Gómez-Lim, M.Á., Guzmán-Ortiz, D.A., & Peña-Cabriales, J.J. (2011). *Puntos críticos en el manejo integral de mango: floración, antracnosis y residuos industriales*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(2), 221–234.
- Saucedo-Luna, J., Castro-Montoya, A.J., Martínez-Pacheco, M., & Campos-García, J. (2010). Diseño de un bioproceso para la obtención de etanol anhidro a partir de bagazo del *Agave tequilana* Weber. *Ciencia Nicolaita No. Especial*.
- Sáuco, V.G. (2009). *El cultivo del mango*. Tenerife, España: Mundi-Prensa Libros. 2009.
- Saval, S. (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro. *BioTecnología*, 16(2), 14–46.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2007). *Sistema integral de información agroalimentaria y de pesca del Estado de Chihuahua*. México: SAGARPA.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2010). *Palma de aceite. Monografías de cultivos*. México: SAGARPA.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2015a). *Estudio para la determinación de alternativas de aprovechamiento tecnológico y productivo para la rezaga de mango de las variedades Kent, Keitt y Haden*. México: SAGARPA.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2015b). *Plan rector sistema producto agave tequilero 2015. Comité del sistema producto agave tequilero Michoacán A.C.* México: SAGARPA.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2017a). *Planeación agrícola nacional 2017-2030, Mango mexicano*. México: SAGARPA. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257078/Potencial-Mango.pdf>. Consultado el 25 de febrero del 2020.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2017b). *Planeación agrícola nacional 2017-2030, Mango mexicano. Primera Edición 2017*. México: SAGARPA.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2017c). *Planeación agrícola nacional 2017-2030, Palma de aceite mexicana*. Primera edición 2017. México: SAGARPA. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257081/Potencial-Palma_de_Aceite.pdf. Consultado el 25 de febrero del 2020.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2017d). *Planeación agrícola nacional 2016-2030, Cítricos, limón, naranja y toronja mexicanos*. Primera edición 2017. México: SAGARPA. Consultado el 25/02/2020.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2017e). *Planeación Agrícola nacional 2017-2030: Nuez pecanera mexicana*. México: SAGARPA.

- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2017f). *Se incrementa 83 por ciento la producción de nuez en México*. México: SAGARPA. Consultado el 26/02/2020.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2017g). *Planeación agrícola nacional 2017-2030, Manzana Mexicana, México*. México: SAGARPA. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256430/B_sico-Manzana.pdf Consultado el 27 de febrero del 2020.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA]. (2010). *Palma de aceite. Monografías de cultivos*. México: SAGARPA.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA] y Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. (2015). *Atlas Agroalimentario 2015*, México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.
- Seipel, M., Pirovani, M.E., Güemes, D.R., Gariglio, N.F., & Piagentini, A.M. (2009). Características físico-químicas de los frutos de tres variedades de manzanas cultivadas en la región centro-este de la provincia de Santa Fe. *Revista FAVE-Ciencias Agrarias*, 8, 1. <https://doi.org/10.14409/fa.v8i1.1340>
- Shahbaz, M., Yusup, S., Inayat, A., Patrick, D.O., & Ammar, M. (2017). The influence of catalysts in biomass steam gasification and catalytic potential of coal bottom ash in biomass steam gasification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 468–476. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.153>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP] (2016). *Exportación del limón de Jalisco*.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP] (2018). *Palma africana o de aceite en México: cultivo tropical aceitero*.
- Solleiro-Rebolledo, J.L., & Mejía-Chávez, A.O. (2016). Cadena de valor en la producción de algodón en México: Los desafíos del mercado global. En 21° *Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México*. Mérida, México. AMECIDER – ITM
- Tenorio, C., Moya, R., & Valaert, J. (2016). Characterisation of pellets made from oil palm residues in Costa Rica. *Journal of Oil Palm Res*, 28(2), 198–210. <https://doi.org/10.21894/jopr.2016.2802.08>
- Tirado J.P.A. (2015). *Estudio de compactación de la cáscara de nuez para mejorar la calidad de briquetas de biomasa*. Tesis de Licenciatura, Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador. <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/10366>
- Torres, M.S.M. 2016. *Plan de negocios de exportación de tequila a China*. Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente. Tlaquepaque, México.
- Trejo-Márquez, M.A. (2010). Piel de mango, hueso de chocolate. *Hypatia, Revista de Divulgación Científico-Tecnológica Del Estado de Morelos*, 31, 1–2.
- Unal, H., & Alibas, K. (2007). Agricultural residues as biomass energy. *Energy Sources, Part B*, 2(2), 123–140. <https://doi.org/10.1080/15567240600629401>
- Unión de Fruticultores del Estado de Chihuahua [UNIFRUT] (2007). Unión de Fruticultores del Estado de Chihuahua.
- Urbina-Vallejo, V. (2005). *Propagación de los frutales*. Monografías de fruticultura No. 7. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Paperkite Editorial. Universidad de Lleida. Lleida, España.

- Vaca-Navarro, D., Gutiérrez-Vaca, C., Rucoba-García, A., Hernández-Ruiz, J., Hernández-Ruiz, J., & Villafaña-Aguilera, A. (2019). Estudio de viabilidad económica y comercial para el prototipo de una cosechadora troceadora de agave. *Revista Tecnología En Marcha*, 32(7), 12-19. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i7.4254>
- Valdez-Vazquez, I., Acevedo-Benítez, J.A., & Hernández-Santiago, C. (2010). Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2147–2153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.034>
- Van Dam, J. (2017a). Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa. Bogotá: Fedepalma. Recuperado de <https://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/90667>. Consultado el 19 de abril del 2020.
- Van Dam, J. (2017b). Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa. Bogotá: Fedepalma. Recuperado de <http://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/90667>. Consultado 10 de abril del 2020.
- Vanegas, M. de J. (2002). *Guía Técnica Cultivo del Limón Pérsico*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). MAYA, San Salvador.
- Vega, R.A.O. (1994). *El cultivo de la palma aceitera*. San José, Costa Rica: El EUNED.
- Velázquez, J.R., Colín, P.S., & García, G.J. (2009). *Frutos y semillas de árboles tropicales de México*. México, D.F: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://doi.org/10.22201/iies.0000002e.2009>
- Vites, P., & Eduardo, E. (2012). *Manejo Agronómico de cultivo de algodón (Gossypium barbadense L.), en la Empresa Agrícola Cerro Prieto SAC*. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.
- Zema, D.A., Calabrò, P.S., Folino, A., Tamburino, V., Zappia, G., & Zimbone, S.M. (2018). Valorisation of citrus processing waste: A review. *Waste Management*, 80, 252–273. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.024>
- Zúñiga-Estrada, L., Rosales Robles, E., Yáñez-Morales, M. de J., & Jacques-Hernández, C. (2018). Características y productividad de una planta MAC, Agave tequilana desarrollada con fertigación en Tamaulipas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(3), 553–564. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i3.1214>

Condiciones de cultivo del Sauce (*Salix* sp.)

Isabel López-Cortés^{1*}, Domingo M. Salazar Hernández¹
y Borja Velázquez-Martí²

¹Departamento de Producción Vegetal, COMAV, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia, España.

²Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia, España.

*Autor para correspondencia: islocor@upv.es

1. Descripción

Angiosperma, Dicotiledonea, Salicales, Salicaceae

Con diferentes problemas taxonómicos y de nomenclatura, principalmente debido a su gran variabilidad morfológica que impide una fácil clasificación. El origen se encuentra principalmente en la variación morfológica intraespecífica tan amplia, que obliga a diferenciar subespecies, como ocurre con *Salix alba*, *Salix salviifolia* y *Salix purpurea*. Al mismo tiempo hay otra dificultad que estriba en observar de manera simultánea y en un mismo pie tanto las flores femeninas como las masculinas y las hojas (Blanco, 1993).

Podemos encontrar híbridos interespecíficos espontáneos, como son *Salix alba*, *Salix fragilis* (Triest et al., 2000) o *Salix purpurea* y *Salix salviifolia* (Blanco, 1993), además de muchos más casos.

Son propios de ambientes riparios o suelos encharcados, algunos tienen su hábitat en bosques frescos y otros en paredes agrietadas. Habitualmente tienen un uso restaurador de ambientes de ribera y en otros un aprovechamiento por biomasa. La flexibilidad de sus ramas y las largas raíces, son muy importantes para la reducción de la velocidad de la corriente de agua en las orillas de los ríos, así como actuando en contra de la erosión.

Planta ávida de luz lo que provoca problemas de formación dado que pueden crecer inclinadas buscando la luz. De polinización anemófila y entomófila.

De porte variable y copa péndula globosa. Su corteza es lisa cuando los árboles son jóvenes y empieza a agrietarse con el paso de los años. Sus ramas son flexibles y pendulares. Con hojas simples, alternas, alargadas y con peciolo cortos o muy cortos.

Especies dioicas, agrupan sus flores agrupadas en amentos, protegidas con una pequeña bráctea.

Frutos presentes en cápsulas de alrededor de 3 mm con pequeñas semillas que disponen de un grupo de pelos largos que mejoran su dispersión. Son semillas pequeñas y redondas, envueltas en pelos algodonosos. Hay que señalar que la capacidad de germinar de esta especie es muy breve. Además de la vía sexual, pueden propagarse de forma natural mediante trozos de plantas que normalmente son arrastrados por las corrientes. Esto en algunos casos puede suponer la reducción de diversidad genética (Barsoum, 20002).

Las hojas, normalmente caducas, tienen un peciolo corto y están acompañadas de unas estípulas desarrolladas o reducidas a glándulas.

Requieren suelos con textura franco arenosa, con proporciones de 65% de arena, 20% de limo y 15% arcilla, con un pH óptimo de 6.5-7.

2. Fenología de la especie

Como especies riparias que son la floración puede ser antes o tras el desarrollo de las primeras hojas en los meses de enero y mayo.

3. Distribución

El género *Salix* tiene más de 450 especies presentes en gran parte del mundo, de forma natural o por colonización (Prada et al., 2017), su ubicación principal está en China y la antigua URSS, apareciendo también en Europa, Canadá Norte de África, Sudamérica incluso en India.

Especie muy extendida en las riberas y vegas de los ríos. Prefiere suelos encharcado por lo que su distribución es muy aleatoria.

Una agrupación de este material atendiendo a (Prada et al., 2014) puede ser la siguiente:

- Saucedas negras (*Salix atrocinerea*).
- Saucedas mixtas (*Salix salviifolia*, *Salix purpurea*, *Salix elegnos*, *Salix triandra*).
- Saucedas cantábricas (*Salix atrocinerea*).
- Saucedas meridionales (*Salix pedicellata*).
- Saucedas blancas (*Salix alba*, *Salix alba* x *Salix Rubens*).

La distribución en España y a nivel mundial es recogida por este mismo autor que puede resumirse en el cuadro siguiente.

Tabla 1. Distribución del *Salix*.

Especie	Distribución mundial	Distribución España
<i>Salix alba</i>	Europa, Cáucaso, Asia y Norte de África	Todas las regiones
<i>Salix atrocinerea</i>	Europa y Norte de África	Amplia distribución, Ebro, Guadalquivir
<i>Salix cantabria</i>	Europa	Cordillera cantábrica y Pirineos
<i>Salix daphnoides</i>	Europa	Pirineos

(Tabla 1 continúa en la página siguiente)

(Tabla 1 continúa de la página anterior)

Especie	Distribución mundial	Distribución España
<i>Salix eleagnos</i>	Europa, Asia y África	En casi todas las regiones
<i>Salix fragilis</i>	Europa, Cáucaso, Asia	En casi todas las regiones
<i>Salix pedicellata</i>	Europa y África	Sistema Penibético y Sierra Morena
<i>Salix purpurea</i>	Europa, Cáucaso, Asia, Mongolia y África	En casi todas las regiones
<i>Salix salviifolia</i>	Europa	Castilla León, Madrid. Extremadura
<i>Salix triandra</i>	Europa, Cáucaso, Asia, Siberia, China y África	En casi todas las regiones

4. Exigencias de cultivo

Especie tolerante al frío, puede encontrar hábitats óptimos en latitudes que superan los 65°N y con altimetrías hasta los 2.500 metros. Por este motivo, es una especie muy extendida por las zonas de montaña de toda España.

Su óptimo altitudinal estaría de 0 a 2.000 m por encima de esta altimetría puede estar presente, pero con un porte más arbustivo.

Vive en climas submediterráneos y en áreas de clima mediterráneo coloniza altitudes más elevadas.

El abanico de temperaturas donde se desarrolla es amplio, siendo su temperatura media entre 4 y 10 °C con una precipitación media por encima de 760 mm. Siendo la precipitación en los meses cálidos de alrededor de 100 mm.

Es conocida su resistencia a las exposiciones al mar incluso a ciertos niveles de contaminación atmosférica.

Especie muy rústica. Sin exigencias destacables de suelo y clima. Resistente al frío, aunque prefiere el clima templado, y los suelos húmedos.

Actualmente se están realizando algunas plantaciones para explotar su madera, los marcos de plantación empleados dependerán de la especie a utilizar en nuestra explotación, pueden plantarse a 1.5 m, salvo los *Salix* euroamericanos que disponen de una copa más amplia y deben establecerse a un marco de 2 metros. El marco de plantación lógicamente estará influido por su destino y especialmente por el tipo de suelo. Está claramente influenciado por la insolación recibida, en latitudes mayores estos marcos serán más amplios.

En cuanto a la poda, durante la formación se guiará la parte terminal de la planta eliminando ramas laterales que en esta ocasión son claras competidoras, para de esta forma lograr un eje único que dé lugar a un fuste recto, siendo esto también importante en su empleo en los márgenes de los ríos.

Se mantiene esta práctica a lo largo de los primeros cinco años de la plantación. Posteriormente se realizará una poda de mantenimiento mediante la cual se eliminarán las ramas inferiores y se consigue mediante esta prácticas ramos sin presencia de nudos.

Exigente en cuanto a la presencia de agua, en plantaciones comerciales se requiere el uso de riego por goteo en la época estival o en los meses más secos.

La frecuencia del riego dependerá del tipo de suelo y las condiciones climáticas en las que se desarrolla el cultivo.

Necesita entre 6 y 7 cm³ de agua por días y gramos de materia seca durante el periodo vegetativo.

Será dependiente lógicamente de la zona de cultivo, pero puede variar entre 2.000 a 8.000 m³/ha/año (Montoya, 1993; Gual, 2000). Durante los primeros años de la explotación puede utilizarse el riego por aspersión para posteriormente utilizarse goteo o gravedad como sistemas de aporte e agua, consiguiendo al mismo tiempo mayor resistencia de la planta ante el viento y humedad si se realizan los aportes de agua de forma espaciada y por goteo o gravedad.

Debe mantenerse durante los primeros cuatro años un control sobre el suelo para mediante el pase de disco controlar la vegetación competidora, enterrar las hojas tras su caída, aumentar la permeabilidad y aireación, así como aumentar el desarrollo de raicillas tras una leve ruptura de las raíces superficiales.

Fertilización. Establecida la primera fertilización a partir de los análisis previos que se realicen en el terreno, debe recomendarse según Montoya (1993) en el inicio de la plantación el aporte de 120-140 kg de potasio y fósforo, junto con 40 t/ha de estiércol como base que debe repetirse cada cuatro años.

Como mantenimiento a partir del tercer año debe aportarse alrededor de 70 kg de fósforo y potasio junto con 40 kg de urea.

5. Características energéticas de la madera

Especie muy utilizada en el norte de Europa por su interés energético, se encuentra en fase de estudio e idoneidad en España.

Según su destino los diámetros recomendados son:

- Para industria de pulpa o papel: mayores de 7 cm.
- Para industria de aserradero: mayores de 20 cm.
- Para la obtención de chapas: mayores de 30 cm.

Su uso puede extenderse también en zonas de pastoreo como sistema de aprovechamiento dado su ciclo tan largo de cultivo.

6. Principales plagas y enfermedades

Plantas muy propensas al desarrollo de enfermedades fúngicas por lo que resulta de gran ayuda la desinfección de herramientas de trabajo de forma habitual. Así como la vigilancia cubriendo las heridas o cortes de poda.

7. Estudio económico

Usada la madera desde antiguo para la elaboración de utensilios domésticos y en agricultura.

Dispone de diferentes usos medicinales, principalmente de su corteza, así como de las hojas por su alta composición en salicina, de donde se obtiene el ácido acetilsalicílico muy usado como analgésico, por lo que antiguamente fue utilizado con fines terapéuticos.

El momento de corta y aprovechamiento está entre los 10 y 15 años según su zona de cultivo con rendimientos de 250 t/ha (Anthos, 2010).

Hay que destacar el papel que juegan las especies arbustivas de *Salix* para el control de la erosión por su fácil enraizamiento a partir de trozos vegetativos. En algunos casos se han colocado las propias ramas como una estructura que permite sujetar el suelo y en otras ocasiones ha sido mezclado con otros materiales inertes para ejercer de sistema de estabilización.

8. Referencias

- Anthos (2012). Sistema de información de las plantas de España. Real Jardín botánico CSIC Fundación Biodiversidad.
- Barsoum N. (2002). Relative contribution of sexual and asexual regeneration strategies in *Populus nigra* and *Salix alba* during the first years of establishment on a braided gravel be driver. *Evol. Ecol.* 15: 255-279 pp.
- Blanco P. (1993). *Salix* L. En Flora Ibérica. Plantas vasculares de la Península Ibérica e Islas Baleares. Vol. III. Plumbaginaceae (Castrobiejo S. et al. Editores). Real Jardín Botánico. Madrid. 471-517 pp.
- Dreesend D (2003). Propagation protocol for ontainer willows in the Southwestern US using sedes. *Native Plants J.*, 4: 118-124.
- Gual Ortí J.J. (2000). *Árboles y arboledas singulares de las comarcas de Castellón*. Diputación de Castellón Editorial, 579 pp.
- Montoya-Oliver, J.M., (1993), Material vegetal para la restauración de zonas semidesérticas. En: *Las ramblas mediterráneas: Actas de la VI Aula de Ecología*. Instituto de Estudios Almerienses, 87-93 pp.
- Prada M.A., Rueda J., Magdaleno F., Martínez R. *Salix* spp. En *Producción y manejo de semilla y plantas forestales* vv.aa. (2014). Naturaleza y Parques nacionales. Serie forestal. Org. Auton. De Parques Nacionales. MAAMM Ed.

Condiciones de cultivo del Chopo (*Populus sp.*)

Isabel López-Cortés^{1*}, Domingo M. Salazar Hernández¹
y Borja Velázquez-Martí²

¹Departamento de Producción Vegetal, COMAV, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia, España.

²Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, Valencia, España.

*Autor para correspondencia: islocor@upv.es

1. Descripción

Características generales

Árboles caducifolios y dióicos, de crecimiento rápido alcanzando sin problemas los 35 m de altura. Árboles exigentes en luz y agua para lograr un adecuado desarrollo. Prefieren suelos con textura franca o franco arenosa, siempre que disponga de una buena aireación, estructura y adecuada compactación. Su profundidad limitante está en 2 metros.

Árbol

Con copa variable entre globosa, o piramidal en función de la especie. Al igual que la forma de las grietas presentes en la corteza.

Hojas

Son árboles dioicos, con hojas simples que pierden en otoño sus pedúnculos

Caducas, simples, alternas y con peciolo delgado y rojizo y estípulas marcadas. Son de forma oval y lóbulos que presentan diferente profundidad, siendo claramente presente el dimorfismo.

Flores y Frutos

Flores unisexuales, dispuestas en amentos colgantes, con frutos en cápsulas dehiscentes que encierran numerosas semillas pequeñas con pelos algodonosos que facilitan su movimiento con el viento.

2. Distribución

Origen en el Norte de África, Europa y este de Asia. A partir del siglo XVIII se difunde por Europa, apareciendo por prácticamente todos los caminos, carreteras y paseos.

El área de dispersión del Chopo, género *Populus*, se encuentra a lo largo del Hemisferio Norte. Siendo alrededor del 90% de los álamos cultivados de la sección Aigeiros correspondiente a la zona templada del Hemisferio Norte, en la que se incluyen *Populus nigra* y *Populus deltoides*.

Dentro del género ya presente en el Cretácico inferior hay muchas especies claramente diferenciadas especialmente por su porte o hábito de crecimiento y por sus hojas, las especies más frecuentes son *Populus alba* L de porte muy vertical, tanto el árbol como sus ramificaciones desde la base, *Populus nigra* L de porte abierto, *Populus tremula* L con largo peciolo foliar, *Populus tremuloides* Michx, *Populus deltoides* con una forma característica de sus hojas, *Populus bolleana* Mast, *Populus ilicitana* Dode, *Populus diversifolia* Schrenk, *Populus canadiensis* Moench, *Populus euroamericana* Goinier. En realidad, incluye más de 40 especies de zonas templadas y más o menos frías especialmente en el hemisferio sur.

Su distribución geográfica en España ocupa prácticamente todas las ecologías, siendo su principal desarrollo la Cuenca del Duero. Incluso en algunas zonas son ampliamente cultivados.

Una clara especie de luz, y gran colonizadora de terrenos vacíos de ribera, tiene una distribución amplia para su cultivo desde los 600 a los 1.000 metros de altitud.

Con clara indiferencia ante las precipitaciones si dispone de suficiente agua en superficie. Es por lo tanto una especie de clima continental que soporta tanto los excesos de calor como la presencia de frío.

3. Exigencias del cultivo

Temperatura mínima y máxima, rango óptimo

El crecimiento óptimo del chopo se produce en zonas cálidas, alrededor de los 20 °C de manera continua. A pesar de esto, de acuerdo a todas las zonas donde vegeta el rango de temperaturas que aguanta es muy amplio. Tolerancia heladas con temperaturas de hasta -17 °C, y el calor cuando supera los 30 °C, siempre que esto no afecte al suministro hídrico.

Crece en lugares fríos, pero probablemente su velocidad de crecimiento será más lenta que en climas cálidos.

Fotoperiodo

Es exigente en cuanto a las necesidades lumínicas, por lo que solo puede vegetar en zonas con exposición directa al Sol.

Necesidades de agua

Dada su vegetación en terrenos húmedos, las necesidades exactas no han sido establecidas. Es importante un buen drenaje, pues el encharcamiento sí que puede suponer

un problema. Además, en caso de no disponer de riego, si las necesidades se cubren únicamente con la lluvia, esta ha de ser uniforme a lo largo del año, para evitar largas épocas de sequía.

En épocas de sequía, las plantas tendrán que ser regadas semanalmente en primavera y verano.

Según las ubicaciones en las que se tiene constancia de su vegetación, soporta unas precipitaciones máximas de entre 2000 a 4000 m³ ha⁻¹ por temporada, y unas precipitaciones mínimas, en climas más áridos, de 600 m³ ha⁻¹.

Es recomendable calcular la evapotranspiración del cultivo, ya que aportaciones superiores no incrementan la producción de biomasa (Sixto et al., 2001), pero no cubrir sus necesidades repercute en una mayor incidencia de plagas y enfermedades.

Esta especie se ha usado en humedales y zonas con exceso de agua para secar el terreno. En caso de existir déficit de agua, las hojas se tornarán amarillentas y caerán, y su crecimiento se ralentizará.

Necesidades nutricionales

El álamo blanco es una especie poco exigente, por lo que el abonado no sería necesario en suelos frescos y con una riqueza normal.

En plantaciones regulares se recomendaría un abono orgánico al establecer la plantación y un complemento mineral fraccionado a lo largo del cultivo.

Se aconseja un análisis del suelo tras la tala de la plantación, para evaluar hasta que punto se ha agotado este. En caso de poseer bajos contenidos de materia orgánica, se recomienda una estercoladura.

Exigencias de suelo

Es un árbol que crece en todo tipo de suelos, sean arenosos o calcáreos, siempre que estén bien drenados. No se desarrolla en terrenos pedregosos pues sus raíces no alcanzan la humedad. Vegeta también, aunque con dificultad, en las cercanías del mar con intrusiones de agua marina, aunque su preferencia son suelos frescos, ricos en materia orgánica y húmedos.

No requiere de suelos nivelados para su plantación.

4. Fenología de la especie

Plantación con raíz verano en el caso de plantones o barbados, teniendo en cuenta que se realice a hoja caída y al final del mismo para el caso de estacas.

5. Principales plagas y enfermedades

No suelen ser excesivamente problemáticas en el caso del chopo y solo serán tratadas químicamente en caso de que el ataque sea tan fuerte como para disminuir o

anular el crecimiento de los árboles, en caso contrario el chopo asume perfectamente estas situaciones.

Los principales problemas aparecen por las defoliaciones y ante todo por su afección sobre árboles jóvenes.

Principales plagas

Melanophila picta. Produce un anillado en la base de los troncos, perdiendo calidad la madera en caso de superar la base del tronco. Debe vigilarse la puesta de huevos al principio de la primavera.

Gypsonoma aceriana. Su ataque se observa en las perforaciones de las yemas. Suelen ser más problemáticos sus ataques en plantaciones jóvenes, principalmente por la pérdida de la guía.

Paranthrene tabaniformis. Conocido como perforador de troncos de chopos jóvenes. Debe vigilarse al comienzo de la primavera, dado que su mayor daño es la fragilidad ante los vientos o la pérdida de la guía en los árboles jóvenes.

Leucoma salicis. Oruga defoliadora importante, que puede obligar a secarse el árbol. Debe tratarse mediante pulverización a la copa.

Enfermedades

Venturia populina. Aparece principalmente con tiempo húmedos y cálidos, cuyo daño puede llegar a necrosar tanto hojas como ramillas. Las mejores medidas son la poda y destrucción durante el invierno de las hojas afectadas.

Taphrina aurea. Conocida como abolladura de las hojas con el envés recubierto de micelio blanquecino. Su afección es principalmente en árboles jóvenes, en casos graves puede hacerse un tratamiento cúprico.

Cytospora chrysosperma. Su sintomatología son punteaduras naranjas en la corteza. Puede atacar a árboles previamente debilitados, por lo que no es habitual realizar tratamientos.

6. Técnicas de cultivo

Tecnología preparación del suelo

Antes de realizar la plantación, debemos asegurarnos de la nivelación del terreno con un tractor de cadenas que nos permita no solo eliminar los hoyos sin también facilitar el posterior laboreo y asegurarnos previamente la eliminación de los árboles anteriores o des-toconado, de los tocones del turno anterior. Puede usarse como técnica tanto el uso de herbicidas sistémico o arrancándolos con retroexcavadora, siendo más económica la primera opción aplicando el herbicida durante el movimiento de savia.

Marco de plantación

El espaciamiento en la plantación nos definirá el turno óptimo necesario para conseguir un tamaño que facilite un rendimiento económico adecuado.

En función del terreno de plantación podemos establecer marcos más o menos amplios:

6x6; 5x5	279-400 plantas/ha	terreno más rico
7x7; 6x6	200-250 plantas/ha	terreno menos rico

Tecnología de fertilización

El abonado debe repercutir económicamente en el crecimiento futuro de los árboles, por lo que para poder establecer una fertilización óptima debemos realizar obligatoriamente un análisis de suelo con el que podamos establecer las carencias en nutrientes y establecer unas dosis correctas de fertilizantes.

Fertilización en plantación. Aproximadamente a 60-80 cm de profundidad debe establecerse un abono alto en fósforo y preferentemente de liberación lenta

Fertilización en superficie. Realizar este aporte durante la primavera antes del gradeo en los años 3º, 6º y 9º.

Sistema de riego

No podemos olvidar los riegos cuando la plantación se haga superficialmente dado que en los demás casos la capa freática es suficiente, intentando utilizar el riego mediante regeros frente a l clásico riego a manta.

Estos riegos deben siempre ser espaciados entre 15 días y caudal abundante para favorecer un buen desarrollo radicular.

Poda

Acción imprescindible para obtener los fustes rectos y limpios de ramas, el objetivo es de forma general obtener los primeros 3 metros o en choperas de buen crecimiento hasta 6 metros, libres de ramas.

Realizaremos por lo tanto una poda de formación en los primeros años y posteriormente en su primera mitad del turno una poda de conformación del fuste.

Es muy importante elegir correctamente la guía dominante, y eliminar aquellas otras que compitan con la guía, para ello se cortarán 1 o 2 ramas y el resto se dejarán pinzadas Eliminando aquellas ramas demasiado gruesas que puedan bifurcar el tronco.

En caso de utilizar maquinaria para realizar la poda será a partir del 4 o 5 año, realizando tanto manual como mecánicamente solo una poda hasta 3 metros.

Tala

Debe realizarse la tala según intereses de máximo volumen de madera, con requerimientos dimensionales medios de 35 cm a 1,3 m del suelo. Estos valores son normalmente alcanzados a los 13 o 15 años.

7. Estudio económico

En la actualidad y debido al poco trabajo que exigen estas explotaciones, a excepción de los primeros años de plantación y de forma muy localizada en unos días concretos, nos

encontramos con que las parcelas suelen ser con un claro minifundismo y con una propiedad muy dispersa.

Estos impedimentos traen consigo una clara bajada de la rentabilidad obteniéndose de forma general los siguientes valores:

Tipo de suelo	Marcos plantación (chopos/ha)	Turno (año)	Rentabilidad (€/h/año)
Muy bueno	350	13	1.200
Medio	350	14	400
Bajo	250	16	250

8. Características energéticas de la madera

Especie de albura blanca y duramen blanco amarillento. Madera con brillo suave y textura fina y homogénea. Es clasificada como una madera de baja densidad (0.45 g/cm^3).

Pierde muy rápidamente la humedad, por lo que se recomienda un secado lento en cámara para evitar problemas de rajado y/o deformaciones.

Bambú una alternativa de biomasa para energía en el Perú

Mary Flor Césare Coral^{1*} y Héctor Enrique Gonzales Mora²

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

²Círculo de Investigación en Bambú, Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad Nacional Agraria La Molina, Av. La Molina s/n, La Molina, Perú.

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

1. Descripción

1.1 Características generales

El bambú incluye todas las plantas de la familia de gramíneas Subfamilia de Poaceae Bambusoideae, estas pueden ser leñosos o herbáceos, con una considerable variabilidad en el hábitat, encontrándose principalmente en ecosistemas tropicales a templados cálidos, con cierta diversidad en regiones templadas frías (Vorontsola, Clark, Dransfield, Govaerts, Baker, 2016). Así el bambú, se caracteriza por tener un porte recto y alto, llegando a alcanzar entre 20 y 30 m en estado de madurez, según la especie. Estas plantas se caracterizan por su rápido crecimiento entre 7.5 a 100 cm por día Buckingham et al. (2011), siendo el bambú *Phyllostachys edulis* (Japón) el de mayor crecimiento, con el récord de 1.2 m. en 24 horas (Londoño, 2006), así el crecimiento del tallo culmina dentro de los 3 a 4 años, sin embargo su lignificación puede durar hasta los 6 años Gonzales (2004), así mismo presenta una corteza lisa y verdosa blanquecina, que, en constante renovación, libera escamas que provocan manchas grises o parduscas sobre el tronco.



Figura 1. Plantación de bambú (*Guadua angustifolia*).

Así mismo estas plantas son muy exigentes en agua en la etapa de crecimiento, prefiriendo zonas con más de 1000 mm de precipitación (Gonzales, 2017). Las hojas son lanceoladas u ovaladas de color verde. A diferencia de los otros pastos, los bambúes son solo un linaje importante dentro de la familia para adaptarse y diversificarse en el hábitat del bosque.

Los bambúes leñosos, o los pastos de los árboles, son una característica cultural y ecológica de muchos países de Asia, África y América, donde los bambúes pueden proporcionar beneficios ambientales y sociales. Los bambúes son plantas multipropósito que puede sustituir a la madera en muchos aspectos debido a sus culmos lignificados a su rápido crecimiento, intrincado sistema de rizomas y sostenibilidad, se ha convertido en una planta con valor de conservación capaz de mitigar los fenómenos que resultan del cambio climático global (Vorontsola Clark, Dransfield, Govaerts, Baker, 2016).

Este trabajo, muestra la presencia de bambú en el Perú, sus diferentes especies nativas, así mismo se tratará mayormente sobre la especie *Guadua angustifolia*, por ser la especie comercial más difundida en el Perú.

2. Distribución geográfica

Los bosques de bambú del mundo tienen amplia distribución global, se encuentran principalmente en zonas con climas tropical, subtropical y templadas, encontrándose en Asia-Pacífico (67%), América (30%) y África (3%), no se han encontrado especies nativas en Europa (Huang, 2019), distribuyéndose entre los trópicos de Cáncer y Capricornio desde el nivel del mar hasta las montañas (Londoño, 1991).

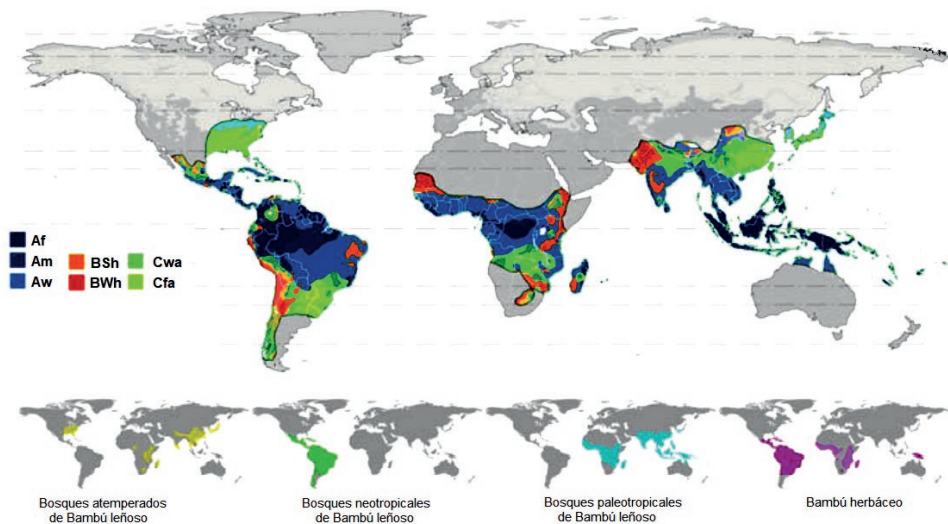


Figura 2. La distribución del bosque de bambú. Nota Af: Clima de selva tropical; Am Clima monzón tropical; Aw: clima de sabana tropical; BSh: clima semiárido caliente; BWh; clima cálido desierto; Cwa/ Cfa: clima subtropical húmedo.

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). La isla de Madagascar es rica en géneros y especies endémicas, superando al África. Así Australia presenta especies endémicas. 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 (Londoño, 2005).

Una característica del bambú es que se desarrollan en hábitats húmedos (selvas nubladas y selvas bajas tropicales), sin embargo, se encuentran especies en hábitats secos como los bambúes *Dendrocalamus strictus* y *Guadua amplexifolia* provenientes del Asia y la *Guadua amplexifolia* del Nuevo Mundo (Añazco y Rojas, 2015).

Así Huang (2019), muestra la distribución del bambú en los diferentes continentes en la Tabla 1:

Tabla 1. Distribución de bosques de bambú en el mundo.

Continente	Número de especie	Países
Asia pacífico	Más de 50 géneros y 900 especies	China, India, Myanmar, Tailandia, Bangladesh, Cambodia, Vietnam, Japón, Indonesia, Malasia, Filipinas, Corea del Sur, Sri Lanka, etc.
América	18 géneros, más de 270 especies	México, Guatemala, Costa Rica, Nicaragua, Honduras, Colombia, Venezuela, Brasil, Ecuador, Perú, etc.
África	Más de una docena de especies	Desde la zona oblicua del noroeste al sureste que abarca el bosque africano y el bosque mixto de hoja perenne y caducifolio.
Europa	No especies nativas	Países de Europa como Francia, Inglaterra, Alemania, Italia, Bélgica y presentan especies introducidas provenientes de países Asiáticos, Africanos y Americanos

Fuente: Elaboración propia a partir de Huang. 2019.

Las especies tropicales de bambú se encuentran distribuidas en Asia Pacífico, América y África. Estos bambúes no son resistentes a las heladas, por lo que no pueden crecer ni en latitudes y altitudes altas. Las especies de bambú representativas incluyen el género *Guadua* en las américas, así como el género *Dendrocalamus* y la *Bambusa* en Asia Huang (2019), como podemos observar los bambúes tropicales se caracteriza por desarrollarse en hábitats húmedos (selvas nubladas y selvas bajas tropicales), sin embargo, se pueden encontrar especies en hábitats secos como los bambúes *Dendrocalamus strictus* y *Guadua amplexifolia* provenientes del Asia y la *Guadua amplexifolia* del Nuevo Mundo. (Añazco y Rojas, 2015). También se encuentran bambúes distribuidos en altitudes más altas que los trópicos, distribuidos principalmente en China, Japón y Corea del Sur en Asia, donde hace frío en invierno, estos bambúes tienen resistencia a las heladas relativamente más fuerte, siendo las especies de bambú representativas los géneros *Arundinaria* y el *Phylostachys*, este último incluye el bambú Chino Moso (nombre científico; *Phylostachys heterocycla* (Carr.) Milford cv *Pubescens*).

En América, solo hay tres subespecies nativas que pertenecen al género *Arundinaria*, que crecen por debajo de los 46° de latitud norte en el sureste de los EE.UU. (Huang, 2019), así 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). Siendo la isla de Madagascar rica en géneros y especies endémicas, superando al África. Australia presenta especies endémicas. 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 (Londoño, 2005). Siendo el género *Guadua* ampliamente distribuido en América Latina, desde Argentina hasta la zona central y sur de México, abarcando las áreas entre 22 y 23° de latitud norte y 30° latitud sur, incluyendo las costas del mar Pacífico y del Atlántico (nivel del mar), hasta los 2 200 metros de altura sobre el nivel del mar (andes ecuatorianos), ocupando generalmente suelos fértiles secos de la costa y húmedos de la selva (Giraldo y Sabogal, 1999). Añazco (2013) y Londoño (2010) indican que la mayoría de especies que tiene utilidad en América Latina son los bambúes del género *Guadua* y del género asiático *Bambusa vulgaris*, Añazco (2013) indica también que las especies de los géneros *Apoclada*, *Chusquea*, *Elytostachys*, *Otatea* y *Rhipidocladum*, su uso es especialmente doméstico así mismo Londoño (2010) indica también otras especies introducidas como *B. tuldooides*, *Phyllostachys aurea* y *Dentrocalthamus* spp.

El Perú es uno de los países andinos más ricos en diversidad de especies de bambú Londoño (2002), encontrándose distribuidos en sus tres regiones (sierra, selva y costa), cada región presenta especies representativas así en la sierra la especie características es la *Chusquea*, en la selva amazónica el bambú *Guadua weberbaueri* y en la costa la especie representativa es la *Guadua angustifolia* (Añazco y Rojas, 2015). Takahashi & Asencios (2004) indica que los Dptos. de Madre de Dios y Amazonas son los que presentan mayor área cultivada y los departamentos de Cusco y Pasco los que albergan mayor diversidad, así mismo en el inventario realizado por Londoño (1998) para América Latina y particularmente para el Perú, informa que existen 36 especies nativas de bambú reunidas en 8 géneros indicando que los departamentos que albergan mayor diversidad de especies de bambú son Pasco y Cusco y los departamentos que presentan mayor cobertura de estos son Madre de Dios y Amazonas, así mismo Londoño (2010) indica que en el bosque tropical ubicada en la región nororiental conformada por los departamentos de San Martín, Amazonas, se encuentran 8 especies nativas conformadas por 2 bambúes herbáceos pertenecientes a la tribu *Olyraea* y 6 bambúes leñosos de la tribu *Bambuseae*.

Tabla 2. Distribución de especies en los departamentos de San Martín y Amazonas.

Especie/s	Departamento/s	Altura (m s.n.m.)
<i>Guadua affinis angustifolia</i>	San Martín Amazonas	190 – 833
<i>Guadua weberbaueri pilger</i>	San Martín	332 – 918
<i>Olyra latifolia</i>	San Martín Amazonas	440 -490
<i>Olyra fasciculata</i> Trinius	San Martín	493 – 689
<i>Rhipidocladum racemiflorum</i> (Steudel) Mc Clure	San Martín	852
<i>Chusquea</i> Sp	Amazonas	1 848 - 2 300

Fuente: Elaboración propia a partir de Londoño. 2010.

Así mismo Londoño (2012) menciona a otras especies nativas de este género, siendo estas las siguientes especies: *Guadua glomerata* Munro, *Guadua sarcocarpa* spp. *purpuracea* X. Londoño & Peterson, *Guadua sarcocarpa* spp. *Sarcocarpa* X. Londoño & Peterson, *Guadua superba* Huber, *Guadua weberbaueri* Pilger. *Guadua weberbaueri* y *Guadua sarcocarpa* las cuales están distribuidas en la región Amazónica del Perú (regiones de Amazonas, Cusco, Huánuco, Junín, Loreto, Madre de Dios, Pasco y San Martín), cubriendo más de 500 000 ha en una elevación de 100 a 1500 m en sitios donde existen bosques maduros y secundarios en suelos aluviales (Organización internacional de las Maderas Tropicales [OIMT], 1995).

En la siguiente Figura se muestra la distribución natural de las diferentes especies de bambú distribuidas en el territorio peruano, registrándose que el género *Guadua* como una de las especies mayoritarias, seguida del género *Chusquea*. Encontrándose especies nativas y exóticas en las diferentes regiones del Perú (Cusco, Junín, Madre de Dios, Ucayali, ocupando una extensión de 39 978 km² de bosque, predominando la especie *Guadua* en las regiones de Loreto, Ucayali, Madre de Dios, Cajamarca, Cusco y Lima (Perúbambú, 2015).



Figura 3. Mapa de distribución natural de bambú en el Perú.
Fuente: Perúbambú (2015).

Siendo las regiones de Cajamarca, Lambayeque, Piura y Amazonas las que abastecen la demanda del mercado nacional, así mismo existen plantaciones pequeñas que son aprovechadas comercialmente al Sur de Lima (Añazco y Rojas, 2015).

Otros autores como Londoño y Peterson (1991) indican que las principales especies de bambú en el Perú son: *Guadua* aff. *angustifolia*, *G. weberbaueri*, *G. sarcocarpa* y la especie introducida más conocida y estudiada en el Perú es el bambú *Guadua angustifolia*, la cual es cultivada por la gran demanda del sector construcción, para productos de transformación

mecánica y química que se vienen desarrollando (Añazco y Rojas, 2015), sin embargo las especies nativas no son muy conocidas por ello son usadas localmente (Reátegui, 2009; Bamonte y Kociancich, 2007 y Judziewicz, et al., 1999), estos son poco abundantes en la región selva central, presentándose en lugares marginales o bosques fragmentados en donde todavía no se la ha cortado y quemado (Catpo, 2019), así mismo estas especies se caracterizan por la facilidad para colonizar terrenos (Nelson, 1994), así como por su rápido crecimiento, lo que las hace interesante para usos industriales, al ser asequibles y de disposición inmediata para el poblador local, constituyéndose en un recurso potencialmente productivo y rentable. Sin embargo, existen vacíos de información y confusiones en cuanto a la identificación taxonómica como lo indican los autores (Móstiga, Cano, Quispe y Móstiga, 2019).

El bambú en el Perú, es comúnmente conocidos como caña guayaquil debido a su origen comercial, siendo el bambú *Guadua angustifolia* la de mayor consumo, procedente de la costa de Ecuador como las zonas de Guayaquil, Puerto Viejo, Santo Domingo de los Colorados, Quevedo, etc, Gonzales (2005), sin embargo el bambú también es conocido por diferentes denominaciones según la especie y la región donde se encuentre, así es llamada caña guayaquil en Amazonas y San Martín o bambú macho en el distrito de Mala a la especie *Guadua angustifolia*, en Madre de Dios paca a las especies de bambú *Guadua weberbaueri Pilger* y *Guadua sarcocarpa* Londoño & Peterson (Nelson, 1994) y carricillo, maronilla, marona o carrizo a la especie *Guadua weberbaueri Pilger* en San Martín Londoño (2010).

A continuación, se muestra en la Tabla 3 la distribución de las superficies registradas en hectáreas de bambú a nivel nacional.

Tabla 3. Distribución de las superficies en hectáreas de bambú.

Departamento	Género	Superficie (km)	Nro. de registro
Amazonas	<i>Guadua</i>	375.89	366.00
Cajamarca	<i>Guadua</i>	144.30	104.00
Cusco	<i>Guadua</i>	0.73	2.00
Huánuco	<i>Arundinaria</i>	1.64	2.00
	<i>Bambusa</i>	0.05	1.00
	<i>Dendrocalamus</i>	4.73	10.00
	<i>Guadua</i>	9.51	16.00
	<i>Phyllostachys</i>	2.65	4.00
Junín	<i>Arundinaria</i>	13.90	14.00
	<i>Bambusa</i>	1.42	2.00
	<i>Dendrocalamus</i>	44.53	5.00
	<i>Guadua</i>	56.51	15.00
Madre de Dios	<i>Phyllostachys</i>	2.01	6.00
	<i>Arundinaria</i>	1.50	1.00
Pasco	<i>Bambusa</i>	0.12	1.00
	<i>Guadua</i>	31.92	9.00
Piura	<i>Guadua</i>	261.61	73.00
San Martín	<i>Guadua</i>	67.77	59.00
Ucayali	<i>Gigantochloa</i>	10	1.0

Fuente: SERFOR (2019).

A continuación en la siguiente Figura se muestran tres zonas de mayor producción de bambú en el Perú.

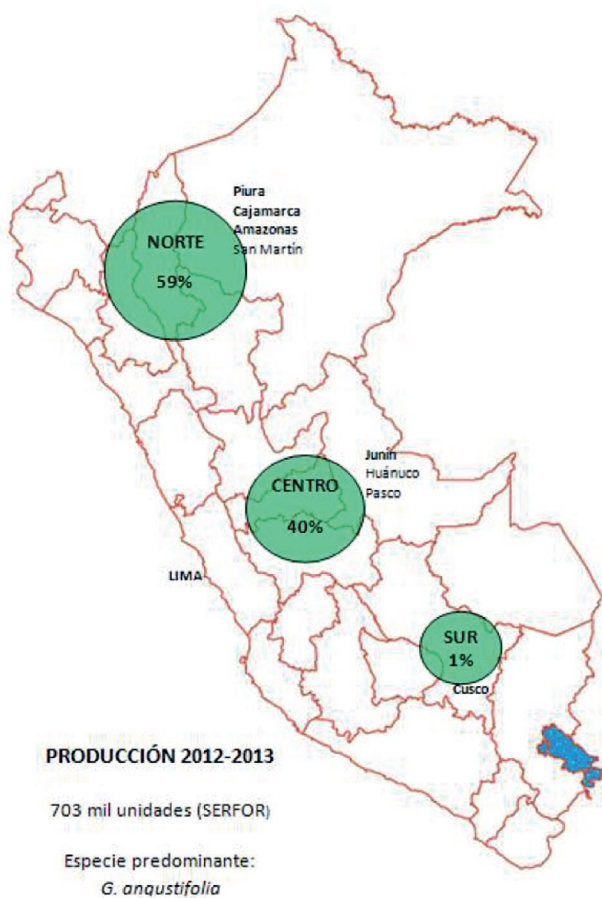


Figura 4. Zonas de mayor producción de bambú en el Perú.

Fuente: Trillo (2019 b).

3. Producción de Guadua en el Perú

Gonzales (2005) muestra el consolidado de información sobre la producción del promedio anual de tallos de *Guadua angustifolia* en la región Piura, registrados entre los años 1995 al 2013.

Tabla 4. Producción promedio de tallos de *Guadua angustifolia* en la región Piura (1995 - 2013).

Unidad	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
1000 u.	34.98	26.06	22.43	16.67	12.12	20.69	35.56	58.85	67.95	98.95
2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	total 1995-2013	Promedio anual
140.1	157.6	168.6	152.0	170.2	217.5	184.3	175.2	174.8	1 934.4	101.8

Fuente: DGFFS: Anuarios estadísticos 1995-2013.

3.1 Producción Nacional de Bambú

Las plantas de bambú tienen mucha importancia, produciéndose en zonas selva tanto selva alta y baja así como en la costa y la selva, siendo utilizada comercializa en su mayoría como material de construcción, no se han reportado este tipo de uso en la sierra debido a sus condiciones frías en la región alto-andinas, así mismo debido a su limitado desarrollo en estas zonas en cuanto a diámetro y altura (Gonzales, 2004).

En el siguiente gráfico se muestran la información de producción a nivel nacional de unidades de caña, reportados por Gonzales (2015) las que fueron tomadas de las estadísticas oficiales Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA] (2005) desde el año 1980 al 2013¹.

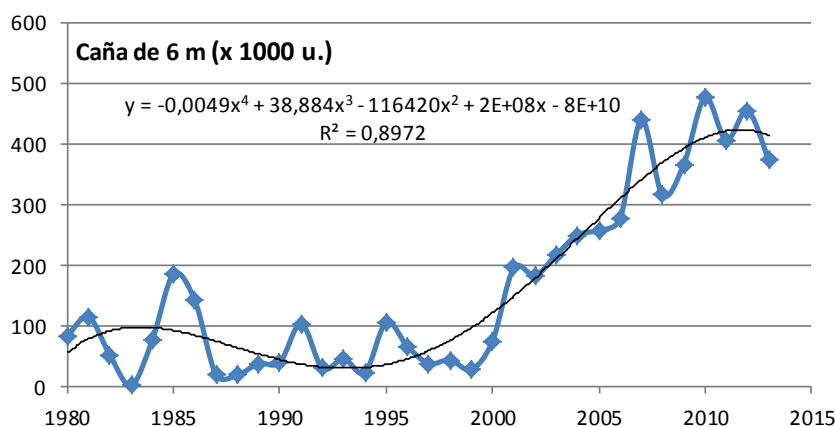


Figura 5. Producción nacional de bambú periodos 1980 - 2013.

Fuente: Gonzales, 2015.

El gráfico muestra que antes del 2000 se manifiesta una tendencia positiva en la producción a nivel nacional: observándose que la producción oficial ya supera las 300 mil unidades de bambú.

¹ Producción del 2003, hasta el mes de junio.

Así mismo Gonzales (2004) indica que se han identificado cinco (05) zonas con carácter productivo, aunque muy divergentes en lo que se refiere a calidad y especie de bambú. Ver Figura 3. Así mismo Gonzales (2005) indica que las zonas productivas son:

1. Zona Norte (regiones de Piura y Lambayeque): existen pequeñas plantaciones de *Guadua angustifolia*, la producción es regular y abastece a Lima, en la misma línea de comercialización de la caña procedente del Ecuador.
2. Zona Nor oriente (regiones de Amazonas y San Martín): El bambú es transportado por río por medio de balsa desde la primera región hasta la zona de San Martín para su acopio, desde allí el producto es sacado por vía terrestre por la Carretera Marginal, hasta Chiclayo acopiándose junto la línea de producción de la zona norte. Siendo la especie predominante la *Guadua superba*.
3. Zona Selva Central (Tingo María, Puerto Bermúdez y Satipo): ubicadas en las regiones Huánuco, Pasco y Junín respectivamente; las cuales abastecen periódicamente a los mercados de Lima. Satipo abastece a un pequeño negocio de zona de Chanchamayo siendo esta zona (3) la que provee el mayor número de especies al mercado de Lima. Se ha identificado a las siguientes especies: *Dendrocalamus asper*, *Guadua angustifolia* Kunth, *Guadua weberbaueri*, *Bambusa vulgaris* var. Schraed. y *B. Vulgaris* var. vittata; también hay algunas especies de *Guadua* aún no identificadas.
4. Zona sur-Oriente (Cuzco y Madre de Dios): En esta zona Gonzales (2016) indica que es probable que aquí se encuentren los bambúes nativos más importantes del país, y que es mínima su influencia en el mercado nacional del bambú y derivados, también manifiesta que un factor decisivo es la distancia al mercado principal y la mala calidad de las cañas lo cual influyen en su poca oferta; también indica que no hay ninguna actividad de manejo del recurso en la zona, a pesar en los años 1999 al 2002, se trató de promover el uso y manejo del bambú en estas zona con un proyecto internacional. En esta zona las especies representativas son *G. weberbaueri* (paca), *Guadua sarcocarpa* (marona) que se confunde con *G. aff angustifolia* Sustenta (2003), Gonzales (2005) indica que esta última no está completamente identificada, pero si clasificada en el Género por su parecido con la *G. angustifolia*. Eventualmente, INRENA ha registrado la producción de bambú de Madre de Dios.
5. Zona sur chico (Mala, Cañete y Lunahuaná): Estas localidades se encuentran en la región Lima, ubicadas en Santa Cruz de las Flores, Mala, allí se tiene la presencia en cantidades importantes las especies de bambú *Guadua angustifolia* Kunth y *Bambusa vulgaris* Schrad; las cuales son cultivadas bajo el sistema de riego, así mismo es usada como linderos de parcelas agrícolas (Gonzales, y otros 2004). Así Gonzales (2005) indica que ha corroborado que esta zona no es proveedora regular de cañas de bambú a los mercados de Lima, a pesar de su cercanía; aparentemente hay un gran desconocimiento sobre la calidad de bambú y sus ventajas económicas; además, la zona 5 es preferentemente agrícola.

ZONAS PRODUCTORAS BAMBÚ EN EL PERÚ



Figura 6. Distribución de Zonas Productoras de Bambú en el Perú.

Fuente: Gonzales (2005).

4. Taxonomía

Los bambúes taxonómicamente pertenecen a la familia Poaceae y a la clase monocotyledoneae. En la Tabla 5. Se muestra la taxonomía del bambú *Guadua angustifolia*, por ser la especie introducida, más conocida y empleada comercialmente en el Perú.

Tabla 5. Taxonomía del bambú.

Reino:	Plantae
División:	Espermatofita
Sub- división:	Angiospermae
Clase:	Monocotiledónea
Orden:	Poales
Familia :	Poaceae
Sud-Familia :	Bambusoidea
Super-tribu :	Bambusodae
Tribu :	Bambuseae
Sub-tribu :	Guaduiniae
Género :	Guadua
Especie:	Angustifolia
Nombre científico :	<i>Guadua angustifolia</i> Kunth

Fuente: (López V, Sterrett, & McDonald, 1987).

Casanova (2018) refiere que en 1822 la *Guadua* fue descrita por el botánico alemán Karl Sigmond Kunth como un género segregado del género asiático *Bambusa* y que posteriormente en el año de 1793 fue reconocida como un subgénero por McClure, así mismo indica que los estudios posteriores tanto anatómicos, morfológicos y moleculares realizados por Soderstrom y Londoño (1987), Soderstrom y Ellis, (1987) y Clark et al. (1995) permitieron establecer que la *Guadua* es un género endémico de América tal como lo expresa (Londoño, s/f).

5. Estado de madurez del Bambú

En las siguientes figuras, se muestra el desarrollo del estado de madurez del bambú *Guadua angustifolia*, 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 manchas blancas por los líquenes en sus tallos, las ramas superiores se secan, la intensidad del color blanco en los nudos disminuye Paucar y LLerena (2018), así mismo presenta paredes gruesas, entrenudos que miden entre 13 a 35 cm y rizoma leptomorfo (Mercedes, 2006).



Figura 7. Diferentes estadios de una planta de bambú de la especie *Guadua angustifolia*.

6. Descripción botánica

El bambú *Guadua angustifolia* por sus propiedades físico – mecánicas sobresale dentro del género de los bambúes, por el tamaño de sus culmos que llegan a medir hasta 25 metros de altura y 20 centímetros de diámetro nominal, siendo seleccionada como una

de las veinte especies de bambúes mejores del mundo ya que su capacidad para absorber energía y admitir una mayor flexión, la convierten en un material ideal para construcciones sismo resistentes (Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador [MAG], 2004).

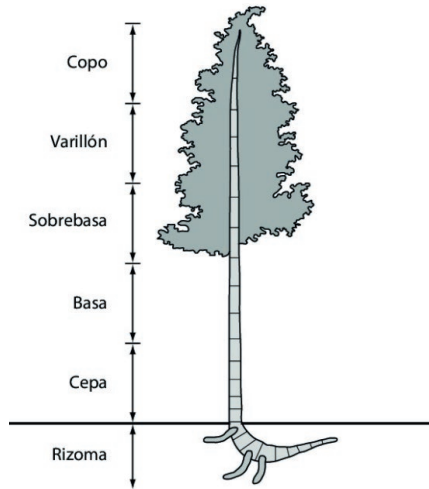


Figura 8. Partes de bambú.

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

6.1 Rizomas

El rizoma del bambú es un tallo o falsa raíz sistema subterráneo importante con múltiples ramificaciones 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). De acuerdo a su morfología, los rizomas se dividen en dos tipos: leptomorfo (monopodial, invasivo) y paquimorfo (simpodial, de matorral) (Banik, 2015).

6.2 Raíz

Las raíces se forman en la región nodal del rizoma (Akinlabi et al., 2017). La cual ayuda en el transporte y almacenamiento de nutrientes, a su vez permite el anclaje estructural en el suelo, presenta formas simétricas y sus diámetros van desde 0.4 a 4.8 mm y no va más allá de 70 cm debajo de la superficie (Banik, 2015).

6.3 Brotes

Llamado renuevo o rebrote, constituye la primera fase de desarrollo del bambú que emerge del suelo, están conectados al tallo madre por el rizoma y se encuentran cubiertos por hojas caulinares color café, que protegen al brote en la etapa inicial de crecimiento del ataque de insectos, estos brotes emergen del suelo con el diámetro definitivo con los

nudos juntos, asemejando un acordeón cerrado, al crecer el bambú los nudos se alejan longitudinalmente formando los entrenudos, de abajo hacia arriba durando aproximadamente 6 meses Pérez y Ríos (2019), tiempo que alcanza su máxima altura, desprendiéndose del tallo, cuando las yemas inician su proceso de activación para producir ramas ([UNISS] y [AVSI], 2017).



Figura 9. Brotes de bambú de *Guadua angustifolia*.

6.4 Tallo

El tallo o culmo de bambú es la parte más visible de la planta, esta se desarrolla a partir de los brotes, se caracteriza por presentar cilindros huecos alargados con articulaciones intermitentes conocidos como nudos. 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 pecíolo del tallo (Akinlabi et al., 2017). La guadua se caracteriza por ser una especie de crecimiento muy rápido logrando incrementos de hasta 11 centímetros al día, alcanzando alturas definitivas entre 18 a 30 metros después de emergen los primeros seis meses del suelo llegando a la madurez entre 4 a 5 años (Londoño, 1995), lo cual permite su máximo aprovechamiento para usos constructivos, se le puede distinguir de otras variedades de bambú por presentar tallos robustos y espinosos, así como bandas de pelos blancos en la región del nudo (MAG, 2004).



Figura 10. Tallo de bambú: a) *Guadua angustifolia*.

6.5 Yemas

Las encontramos ubicadas en cada nudo, de forma alternada, estas tienen la capacidad de producir ramas o raíces ([UNISS] y [AVSI], 2017) y son útiles para la propagación “in vitro”, y en los estudios taxonómicos permiten ayudar a identificar especies, secciones y géneros (Añazco y Rojas, 2015). La ubicación de las yemas va a depender de la especie así en la Figura 11 mostramos la ubicación de la yema en la parte superior del nudo para el bambú *Guadua angustifolia*.



Figura 11. Yema de bambú *Guadua angustifolia*.

6.6 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. ([UNISS] y [AVSI], 2017).

6.7 Ramas

La *Guadua angustifolia* presenta pocas ramas basales con espinas (Londoño, 2009).

6.8 Hojas caulinares

Las hojas caulinares se presentan en la primera etapa del crecimiento; presenta forma triangular color café, se ubica en cada nudo del tallo, siendo su función principal proteger las yemas y el tallo durante el desarrollo de esta (UNISS y AVSI, 2017).



Figura 12. Hoja caulinar bambú *Guadua angustifolia*.

6.9 Follaje

Londoño (2002) indica que el follaje es la principal fuente de producción de alimentos para la planta, esta se encuentra constituida por lámina, vaina y apéndices (fimbrias y aurículas). Así la *Guadua angustifolia* presentan hojas lanceoladas, lisas, se ubican en las ramas en posición alterna, cuya longitud varía entre 8 y 20 cm y de ancho entre 1.5 y 3.5 cm, también presenta en el revés pubescencias (pelillos) blanquecinos esparcidos Centro de Investigación Capacitación, Asesoría y Promoción – [CICAP], 2008).



Figura 13. Hojas de follaje.

6.10 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 entre 15 a 60 años en bambúes tropicales y 60 – 120 años en bambúes de regiones templadas. Existe evidencia de ciclos de floración regular entre 30 a 35 años para la mayoría de especies de bambú leñosos tropicales, ejemplo la *Guadua angustifolia* (Añazco y Rojas, 2015; Guerreiro, 2013). 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 arroz (UNISS y AVSI, 2017), sin embargo, la *Guadua angustifolia* presenta floración esporádica es decir solo algunos individuos de una generación y de un origen común del rodal florecen en periodos irregulares Valdez (2013), que generalmente coinciden con las épocas de lluvia. Además de esto, las semillas presentan periodos de germinación muy cortos (Botero, 2012).

7. Exigencias del cultivo

7.1 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, W., Kohl, M., 2015). La topografía y la condición del suelo son los principales factores que afectan el crecimiento dentro de la misma región climática. El bambú *Guadua angustifolia* presenta desarrollo óptimo en suelos sueltos con alto contenido de materia orgánica, buena capacidad de retención de agua y permeabilidad cuya textura pueden ser textura franco arenosa, areno limosa, arcillosa y franco limoso, estas características facilitan el crecimiento del rizoma Dávila, (2012), ejemplo de ello se puede encontrar en la localidad de La Florida – Cajamarca, cuyos suelos son franco arenosos, donde el bambú *Guadua angustifolia*, presenta un excelente desarrollo, autores como Fernández (2012) y Móstiga (2019) indican que estos bambúes presentan mayor desarrollo en suelos con pH entre 5.5 y 6.0.

7.2 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. Añazco (2013) indica que el bambú *Guadua angustifolia* se desarrolla muy bien en zonas cuya temperatura oscila entre los 20 a 26°C.

7.3 Altitud

Añazco (2013) indica que la altitud afecta la distribución de bambú, encontramos al bambú *Guadua angustifolia* desde el nivel del mar hasta los 1600 m s.n.m., por encima de esta en condiciones favorables se la puede encontrar hasta los 2000 m s.n.m., de altitud, sin embargo, los rendimientos son bajos y el desarrollo de las cañas son delgadas y de baja estatura (Gonzales, 2005).

7.4 Precipitaciones

Los bambúes son escasos en zonas con precipitación menor a 1050 mm, El bambú *Guadua angustifolia* requiere precipitaciones en el rango de 1300 a 4000 mm por año Añazco (2013) siendo óptimo entre los 2000 a 2500 mm/año (Dávila, 2012), así la *Guadua* se encuentra en los bosques húmedo subtropical, bosque muy húmedo subtropical, bosque muy húmedo montano bajo y el bosque seco tropical, en las áreas de bosques muy húmedos y húmedos, así como en las laderas de montaña y cercanos a las riveras de los ríos (Añazco, 2013). Siendo otro factor importante la humedad relativa en el desarrollo de los bosques de bambú con fluctuaciones entre 75 y 85% de humedad (Dávila, 2012).

8. Técnicas de cultivo

Dado que la inflorescencia de los bambúes ocurren en un lapso de tiempo muy prolongado (entre 30 y 120 años) como lo indica Londoño (1995) la reproducción sexual o por semillas del bambú *Guadua angustifolia* Kunth sería muy lenta y de acuerdo a lo manifestado por Hidalgo (1974) que indica que no se asegura la calidad genética de las semillas del bambú, por ello la propagación asexual es más viable que el uso de la semilla, particularmente en las especies gigantes del tipo leptomorfo (rizoma), en las cuales se requiere 10 años a partir de la germinación de la semilla para producir tallos de las dimensiones propias de la especie, y en las especies de tipo paquimórfos (rizoma) le toma alrededor de 9 años.

8.1 Preparación de suelo

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

8.2 Marco de plantación

La corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca [CARVC] (2016) indica para cultivos de bambú *Guadua angustifolia*, que el hoyo 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.



Figura 14. Trazado y hoyado del terreno.

Fuente: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2016.

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 [CARVC] (2016).

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 Propagación por sección de tallos

Esta modalidad requiere del aprovechamiento de culmos moderadamente maduros de 2 a 3 años de edad, cuyo diámetro debe ser 8 cm, dividiendo el tallo en unidades de dos o tres entrenudos que contengan 3 a 4 nudos con buenas yemas. (Castaño y Moreno, 2004). Entre cada dos nudos se hace un hueco y se llena de agua; posteriormente se tapa y se cubre con tierra, posteriormente 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. Castaño y Moreno (2004) indican que se alcanzan entre 50 a 80% de propagación de bambú.



Figura 15. Sembrado de secciones de tallo. a) *Guadua angustifolia* y b) *Dendrocalamus asper*.
Fuente: Forest Bambú Perú. Trillo 2019.

8.4.2 Método de las ramas basales o esquejes

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

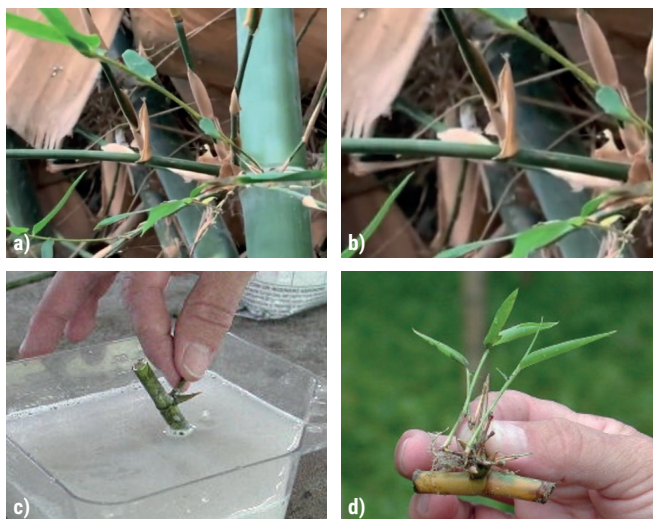


Figura 16. a) Planta madre de *Guadua angustifolia*, b) Explante (esqueje acondicionado),
c) Desinfección del explante y d) Esqueje enraizado.

Pérez y Ríos (2019) optimizaron la propagación del bambú *Guadua angustifolia*, Kunth, determinando que se requiere esquejes de 30 cm de longitud y 20 cm de diámetro, así mismo indicaron que los esquejes cultivados se estabilizan a los 80 días y a los 90 días hay un incremento brotes.

8.4.3 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. Siendo el “chusquin” plantas pequeñas y delgadas que se generan del rizoma Uchimura, (1980), desarrollándose en su primera fase brotes iguales delgados y pequeños, los cuales cumplen el papel de colonización en la zona plantado; luego de colonizado el área empiezan a aparecer brotes de bambú con el doble del diámetro y con altura directamente proporcional al diámetro [CARVC] (2016). La Figura 17 muestra la mata de chusquines y la separación de estos:



Figura 17. a) Mata de chusquines y b) deshije de chusquines,

Fuente: Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2016.

El proceso de propagación de chusquines se realiza en viveros donde se le da una adecuada fertilización humedad y control de malezas, y 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, se estimula el desarrollo de nuevos y abundantes culmos pequeños, luego de 90 días promedio al alcanzar 10 brotes, se extraen las plantas trasplantadas para desprenderse los pequeños culmos exteriores (con sus raíces y rizomas) en desarrollo, las cuales son trasplantados en fundas y colocados durante 3 semanas, a sombra controlada y alta humedad. Luego son llevadas a la zona de crecimiento para su posterior trasplante en el campo. La planta madre se vuelve a colocar en el cantero, así el chusquin se adapta a la siembra en un periodo no menor a 15 días, se observa que aparecen brotes delgados del mismo diámetro que el que las generó, en cantidades variables que van desde 3 hasta 15, brotes que después de 30 días aproximadamente generan nuevos brotes, pero de mayores diámetros. Este proceso es continuo y repetitivo lo cual, si no se interrumpe en esta fase de vivero, genera brotes cada vez más gruesos hasta llegar a diámetros comerciales de 10 centímetros en aproximadamente 3 años. (Mercedes, 2006).

8.4.4 Propagación *in vitro*

Dado que el método de sembrado de semillas, se prolonga largos estadios de tiempos, la propagación *in vitro* es una gran alternativa, esto se realiza en laboratorios con altas condiciones de asépticas, para ello se hace uso de yemas axilares que son colocadas en un medio gelatinoso (agar) que está enriquecido con vitaminas y fitohormonas. Las ventajas que presenta sobre los demás métodos de propagación es que se consigue a partir de una yema meristemática la multiplicación de los tejidos a escala logarítmica, facilitando el intercambio de germoplasma a nivel internacional (Valdez, 2013).

8.5 Disponibilidad de material vegetal y acondicionamiento de explantes

La propagación *in vitro* 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 18). 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).

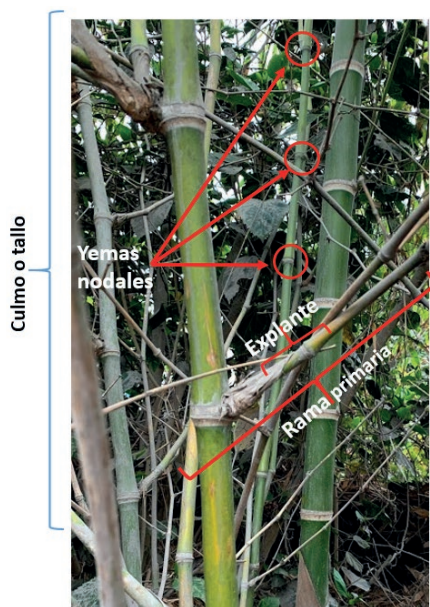


Figura 18. Planta madre de *Guadua angustifolia*.

8.6 Sistema de riego

Siendo el bambú una especie que requiere humedad principalmente durante los primeros años de instalación, por ello es bueno que las plantaciones de bambú se realicen con las primeras lluvias de las estaciones lluviosas garantizando la humedad requerida del suelo para el desarrollo de las plantas, la disponibilidad del agua también puede darse, por riego manual

Las plantas adultas pueden resistir un tiempo la inundación o saturación total del suelo, pero las nuevas plantas son relativamente susceptibles tanto a los excesos como a las deficiencias de agua (Valdez, 2013). La intensidad y frecuencia del riego depende de las condiciones del lugar y condiciones climáticas, así en La Florida Cajamarca el bambú *Guadua angustifolia* se desarrolla espléndidamente, por la buena disposición de agua proveniente de las lluvias, en zonas donde hay poca disponibilidad de agua, principalmente en el verano, es recomendable regar mínimo de 2 a 3 veces por semana hasta que la planta se establezca (UNISS y AVSI, 2017).

8.7 Poda

Las podas se realizan cuando las ramas están maduras (6 a 8 meses). Algunas especies presentan espinas en todos los nodos, es por ello que es conveniente realizar la poda ya que, sino dificulta la cosecha de los tallos, siendo la época seca el tiempo ideal para cosechar bambú destinados para construcciones o para la fabricación de muebles, por la baja emisión de brotes y contenido de humedad de los culmos (Valdez, 2013). Se debe considerar que la cosecha se realiza a los cuatro ó cinco años de establecerse la plantación de: *Dendrocalamus asper*, *Guadua angustifolia*, *Gigantochloa verticillata*, *Gigantochloa apus* (Instituto Técnico de Capacitación [INTECAP], (1990 a). El corte de los culmos se realiza con: machete, sierra y moto sierra, así mismo el corte debe realizarse al ras del nudo Paucar y Llerena (2019), para evitar depósitos de agua y de esa manera no se produzca podredumbre de la planta y entre 15 a 30 centímetros arriba del suelo (INTECAP, 1990 a).



Figura 19. a) Poda de bambú *Guadua angustifolia* y b) Corte correcto del bambú.

8.8 Tecnología de cosecha

El aprovechamiento de las cañas de bambú *Guadua angustifolia* se realiza desde el 4° año de emerger el brote y con una plantación de 5 años de instalación, posteriormente se aprovecha entre 6 a 12 meses o de acuerdo a las necesidades de venta del agricultor, esto acelera el rebrote de nuevas cañas. También se debe considerar la hora adecuada de corte de los culmos, siendo apropiada las primeras horas del día, en donde el flujo del agua del bambú es menor y por consiguiente se evita el ataque de hongos e insectos (Paucar y Llerena, 2018).

8.9 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). Así mismo el bambú está catalogado en diferentes calidades por su diámetro llegando a obtenerse en el mercado hasta 6 calidades, lo cual va en función al diámetro del culmo, así un culmo de extra calidad tiene entre 20 a 25 cm de diámetro.

El sistema existente de prácticas de tala en bambúes forestales se está trabajando en una 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 han 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.



Figura 20. Medición del diámetro del bambú *Guadua angustifolia*.

9. Usos del bambú

El bambú es una planta multifacética por presentar diversidad de usos a nivel mundial, siendo su principal uso la construcción de viviendas, otros usos menores son la construcción de puentes, muebles, artesanías, tejidos Mercedes (2006), escaleras, corrales,

cercos vivos, tendales, así como productos personales de higiene como jabones, champú, y cremas a partir de los aceites esenciales extraídos de sus hojas. Se observa que la mayoría de las partes del bambú se aprovechan así las ramas se utilizan como tutores para los cultivos de arveja, tomate, frijol, fabricación de escobas, así como en la elaboración de aglomerados, paneles y hojas de papel. Las hojas caulinares son usadas en la artesanía y el follaje para alimento de animales menores, los culmos jóvenes son usados para la elaboración de canastos y adornos, los culmos delgados son usados en la producción de instrumentos musicales como quenas, así también los brotes se usan en la elaboración de diversos alimentos como encurtidos (Valdez, 2013).

Otros usos que se da al bambú es la producción de leña y carbón provenientes de la poda y cosecha en la estandarización de la caña comercial, las cuales son abandonadas en el campo así como del aprovechamiento de tallos en la producción de tablillas de bambú Valdez (2013), que generan entre un 70 a 80% de material de descarte (aserrín, astillas trozos de bambú, bambú picado por insectos o manchado por hongos) que, en la mayoría de casos son abandonados en las plantaciones para su descomposición, el cual podría valorarse en la producción de leña o carbón, briquetas, pellets para las cocinas dando cumplimiento al D.L. 1501 Ley de Gestión Integral de Residuos sólidos anexo 9 y 37, así como el Decreto Supremo N° 016-2012-AG del sector agrario.

Con respecto a los usos del bambú *Guadua angustifolia*, Añazco (2015) indica que esta es usada para la elaboración de aglomerados por presentar fibras muy fuertes, así como la producción de laminados, pisos, paneles, esteras, pulpas y papel, lo que abre una opción industrial muy importante que en el Perú recién está empezando a producirse de forma limitada por algunos emprendimientos. También Moran (2015) indica que con esta especie se fabrican Muebles, artesanías, puentes, utensilios, alimento animal, instrumentos musicales, juguetes, elaboración de instrumentos para caza y pesca.

Otras especies de bambú presentes en el Perú como *Dendrocalamus asper* tienen el potencial para ser industrializadas para obtener laminados, pisos, muebles y otros productos. Otras especies como *Phyllostachys aurea* y *Bambusa vulgaris* también presentan usos diferenciados como ornamentos, bicicletas, muebles, artesanías y otros. Añazco (2015).

10. Estudio económico

Para el análisis económico se considerará que se adquieren los plántones 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 6. 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/1,568.00
Sub total de costos 1				S/1,568.00
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/2,096.00
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 / depende 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/1,550.00
Abonamiento y herramientas				
Machete	und	4	9.5	S/38.00
Lampa	und	4	65	S/260.00
Lima triangular	und	2	8	S/16.00
Pico	und	2	23	S/46.00
Wincha 50m.	und	1	120	S/120.00
Cordel	metros	1	20	S/20.00
Insecticida	ml	1	120	S/120.00
Abono NPK (20-20-20) Compomaster	Kilo	5.1	2.5	S/12.76
Compost y/o humus (Saco de 50kg)	Sacos	16.33	25	S/408.16
Sub total de costos 2				S/1,040.92
TOTAL				S/2,590.92

Fuente: Césare, Titto, Paucar, Calle (2019).

Optimización de los procesos de extracción de biomasa Sólida para uso energético
Parte A. Cultivos energéticos y otras fuentes de materia prima

Tabla 7. Costo de mantenimiento y manejo silvicultural de bambú/hectárea durante año 0.

ACTIVIDAD	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO S/.	COSTO TOTAL S/.
MANEJO SILVICULTURAL/LABORES CULTURALES				
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/1,200.00
Sub total de costos 2				S/1,200.00
TOTAL PRODUCCIÓN				S/1,308.00

Fuente: Césare, Titto, Paucar, Calle (2019).

Tabla 8. 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 1año				
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/1,200.00
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/2,253.00
TOTAL PRODUCCIÓN				S/2,288.00

Fuente: Césare, Titto, Paucar, Calle (2019).

Tabla 9. Costo de mantenimiento y manejo silvicultural de bambú/hectárea durante año 2.

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
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/1,200.00
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/2,982.50
TOTAL PRODUCCIÓN				S/3,977.50

Fuente: Césare, Titto, Paucar, Calle (2019).

Tabla 10. Costo de mantenimiento y manejo silvicultural de bambú/hectárea durante año 3.

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
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/1,200.00
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/3,365.00
TOTAL PRODUCCIÓN				S/3,524.00

Fuente: Césare, Titto, Paucar, Calle (2019).

Tabla 11. 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/1,019.00

Fuente: Césare, Titto, Paucar, Calle (2019).

Tabla 12. 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/1,200.00
Sub total de costos 1				S/1,527.50
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/1,300.00
TOTAL PRODUCCIÓN				S/2,827.50

Fuente: Césare, Titto, Paucar, Calle (2019).

Tabla 13. 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/1,000.00
Traslado de cañas a caballete y almacén	Jornal	10	50	S/500.00
Sub total de costos 2				S/1,750.00
TOTAL PRODUCCIÓN				S/2,050.00

Fuente: Césare, Titto, Paucar, Calle (2019).

Tabla 14. 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/1,000.00
Traslado de cañas a caballete	Jornal	10	50	S/500.00
Sub total de costos 2				S/1,750.00
TOTAL PRODUCCIÓN				S/1,950.00

Fuente: Césare, Titto, Paucar, Calle (2019).

Tabla 15. Resumen de costo de producción de bambú en 1 hectárea.

ANÁLISIS DE COSTO DE PRODUCCIÓN DE BAMBÚ EN 1 HECTÁREA									
RUBRO	GASTOS / INGRESOS PROYECTADOS								
	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	TOTAL
	Instalación	Limpieza y Manejo	Limpieza y Manejo	Limpieza y Manejo	Limpieza y Cosecha	Limpieza y Cosecha	Limpieza y Cosecha	Limpieza y Cosecha	Limpieza y Cosecha
Plantación de 7 m. x 7 m. es decir 204 plantas por ha.	S/5,944.92	S/2,288.00	S/3,977.50	S/3,524.00	S/1,019.00	S/2,827.50	S/2,050.00	S/1,950.00	S/23,630.92
INGRESOS PROYECTADOS									
Plantación de 7 m. x 7 m. es decir 204 plantas por ha.	S/-	S/-	S/-	S/-	S/2,448.00	S/8,160.00	S/16,320.00	S/20,400.00	S/47,320.00
Producción / Planta	0	0	0	0	2	5	8	10	
Producción / ha.	0	0	0	0	408	1020	1632	2040	
Precio / Promedio					S/6.00	S/8.00	S/10.00	S/10.00	

Fuente: Césare, Titto, Paucar, Calle (2019).

11. Características energéticas del bambú *Guadua angustifolia* Kunth

El uso del bambú como fuente de energía renovable, que reemplace a los combustibles fósiles es nuevo, por ello se han incrementado los estudios e inversiones en plantaciones de bambú con fines energéticos de forma considerable, así países como Vietnam que ocupa el cuarto lugar en producción de bambú están empezando a considerarlo Truong y Le (2018). Se destaca también que el bambú es una especie que presenta actitudes ecológicas y es abundante en países como China, India y Brasil, así como los múltiples usos al cual está destinado Kleinhenz y Midmore (2001), por ello este se ha convertido en un recurso de biomasa de mucha importancia mundial Scurlock, Dayton, Hames (2000), debido a la alta tasa de desarrollo económico en estos países así Kerlero (2012) indica que por medio de la gasificación se ha realizado la valorización eléctrica de la biomasa de bambú recientemente. Debo agregar así mismo que Darabant et al. (2014) afirma la aceptación del bambú en Los mecanismos voluntarios de financiamiento del carbono, lo cual ha conducido recientemente a la expansión de las plantaciones de bambú también en países como Tailandia, sin embargo, a pesar de la experiencia específica en biomasa el rendimiento, así como las opciones energéticas y alternativas de utilización siguen siendo limitadas.

Se han encontrado experiencias de uso de bambú con fines energéticos en el África donde el INBAR ha desarrollado tres proyectos para la producción de carbón de bambú entre los años 2009 al 2014 siendo estos: Bambú como energía de biomasa sostenible, producción de carbón en el hogar para mujeres y carbón de bambú para la purificación de energía y agua, para atender la demanda de energía en esa poblaciones, por otro lado debo recalcar que Seboka (2010) señala que en Etiopía la producción de carbón constituye una gran alternativa para la valorización de los materiales descartados en el aprovechamiento del bambú dado que tiene más de un millón de hectáreas de tierras altas y tierras bajas de bambú.

En el caso del Perú a pesar que se han encontrado evidencias de la presencia de bambú hace miles de años, su uso ha sido limitado a la construcción y a la artesanía local en general, sin mayor desarrollo de productos, sin embargo la presencia de diferente variedades de bambú tanto nativas como introducidas que presentan alta capacidad auto regenerativa, como el bambú *Guadua angustifolia* que presenta gran velocidad de crecimiento y poco tiempo para alcanzar la madurez (5 años) a diferencia de la madera se presenta como un buen sustituto de ésta para la producción de carbón, así Seboka (2010) indica que esto permitirá cubrir la demanda energéticas urbana y rural para calefacción y cocina. Así la producción de carbón puede obtenerse mediante el proceso de pirólisis o carbonización en seco. En el caso de *G. angustifolia* el proceso se puede realizar utilizando los residuos de cosecha; además se pueden hacer briquetas de carbón con tecnología básica y en la misma zona de producción. Así que hacer carbón y briquetas de bambú es una forma eficiente de utilizar el bambú y ampliar el campo de utilización de bambú (Zhang, Jiang, & Xiao, 2002). Gonzales (2005) ha determinado que la generación biomasa residual por latillado del bambú para la producción de tablillas de las especies *Dendrocalamus asper*, *Guadua weberbaueri*, *Guadua angustifolia* es 28.83 t/ha/año 0.40 t/ha/año 24.44 t/ha/año respectivamente.

Así mismo Gonzales (2005) indica que la producción de carbón vegetal a partir del bambú presenta una gran ventaja sobre el carbón obtenido a partir de madera, siendo su gran capacidad de adsorción y su alta porosidad características deseables de un buen carbón para usos industriales, así como para el tratamiento de agua, etc. También indica que, el licor piroleñoso, producto de la carbonización, puede ser utilizado como insumo para la elaboración de productos químicos y farmacológicos. El mismo autor señala que hay estudios de carbones activados métodos químicos producidos a partir del tallo de *Guadua* (*G. aff. angustifolia* y *G. sarcocarpa*), procedentes de Madre de Dios, que demostraron tener buena calidad. Otro autor Takahashi (s/f) indica a la vez que el carbón de bambú puede ser utilizado como combustible para la cocina y estufa, purificación de líquidos, como filtro para la purificación del aire y el control de la humedad, así como usos terapéuticos y medicinales, finalmente como biochar que actúa como sustrato agrícola. Así mismo indicó que los diferentes usos del carbón en mercados locales son causantes de la deforestación mundial debido al consumo de grandes volúmenes de carbón de madera, indicando que el valor total del carbón de madera importado por la Unión Europea fue de US\$ 255 millones y que el valor total exportado de carbón de bambú en el 2009 fue de US 13 millones.

Autores como Truong y Le (2018) plantean que el bambú presenta mejores características de combustible que la mayoría de las reservas de biomasa, sugieren además que es adecuado tanto para uso térmico y vías bioquímicas, sin embargo, sostienen que puede imponer impactos negativos para el medio ambiente si no se maneja bien, por lo tanto, la selección de bambú como una fuente de biomasa para fines energéticos debe ser evaluada cuidadosamente para evitar o minimizar los posibles riesgos, ya que implicaría la implementación de monocultivos, por ello se vería conveniente el uso de los residuos generados en el aprovechamiento de los tallos para la producción de combustibles sólidos (briquetas, pellet y carbón), en la producción de combustibles gaseosos se tendría al gas de síntesis y finalmente para combustibles líquidos se tendría la producción de biocombustibles de segunda generación como es el bioetanol celulósico, para ello se hace imperante la caracterización del material. Dada la gran variedad de bambú en el Perú tanto de especies nativas como de especies introducidas se requiere realizar estudios de estos materiales para determinar sus potenciales usos.

11.1 Caracterización energética del Bambú

El uso de bambú para fines energéticos es reciente, dada la gran variedad de especies que existen en las diferentes regiones es esencial realizar la caracterización detallada de esta biomasa, siendo los parámetros requeridos la determinación del contenido de humedad, el análisis proximal (reacción termoquímica), análisis elemental, así como los análisis de calor de combustión y contenido de cenizas Stahl, Heinrich, Gehrman, Vodegel y Koch (2004). Siendo el contenido de humedad un parámetro muy importante y en menor medida el contenido de K, Si y Cl de la ceniza representa los factores limitantes en la utilidad de la biomasa de bambú como energía mientras que otras características son comparables a las de la madera Montaña, Pels, Fryda y Zwart (2012). Se tiene que tener en cuenta que el contenido de humedad de los tallos de bambú disminuye a medida que los tallos maduran y existe un gradiente de contenido de humedad entre las secciones inferiores y superiores Engler, Schoenherr, Zhong y Becker (2012). Así autores como Darabant et al. (2014)

plantean que debe determinarse el contenido de humedad, en todas las partes del culmo, estudios realizados por estos autores en bambú determinaron que el contenido de humedad disminuye al aumentar la altura a lo largo de los tallos y con el aumento de la edad del culmo, lo que indicaría que los culmos más antiguos son los más apropiados para la utilización energética sobre todo, las secciones superiores y los nodos de los tallos más antiguos bambú son opciones atractivas como materia prima de bioenergía, esto abre posibilidades para optimizar el uso de diferentes compartimentos de biomasa y grupos de edad para diferentes usos.

Por ello en la Tabla 16 se muestra las características energéticas del bambú *Guadua angustifolia* Kunth:

Tabla 16. Características energéticas del bambú *Guadua angustifolia*.

Poder calorífico (MJ/kg)	19.70 ± 0.73
Humedad (%)	11.15 ± 0.06
Cenizas (%)	3.19 ± 0.22
Volátiles (%)	76.4 ± 1.02
Carbono fijo (%)	9.3 ± 8.20
Contenido en C	45.71 ± 0.16
Contenido de H	5.96 ± 0.43
Contenido en O	45.76 ± 1.32
Contenido en N	0.33 ± 2.40
Contenido en S	0.15 ± 0.88

Fuente: Césare et al. Avances de la Ciencia e Ingeniería. 2019,

12. Conclusiones

El bambú es un interesante cultivo lignocelulósico, de rápido crecimiento, que cumple con la ley de biocombustibles, el cual puede sembrarse en zonas devastadas, cuya principal característica es que puede aprovecharse a partir de los 4 a 5 años (alcanza la madurez), crece tres veces más rápido que otras especies maderables destinadas para fines energéticos, siendo una de sus ventajas el contar con muchas especies y se encuentra en diferente continentes desarrollándose en diferentes climas y altitudes, constituyendo por ello una fuente de biomasa disponible, así como su manejo de cosechas es de ciclo corto, su mantenimiento no es muy costoso dado que requiere el uso de herramientas básicas (machete, lampa, pico) lo que permite incorporarse a la agricultura rural, proporcionando ingresos constantes.

Así mismo el análisis energético del bambú muestra características energéticas, el cual nos indica que podría ser un buen sustituto a la madera, así como a los productos químicos y combustibles a base de aceites fósiles.

Sin embargo, el cultivo de bambú presenta las siguientes desventajas: es de difícil propagación, por la falta de semillas botánicas, debido a sus ciclos inestables de floración (4 a 90 años), por lo que se busca diferentes técnicas para su propagación asexual por métodos vegetativos. Siendo algunos masivos que podrían generar impactos negativos en el medio ambiente, al instalarse como monocultivo, dado que algunas especies son destinadas para usos industriales y/o alimenticios, sin embargo, a pesar de la experiencia específica en biomasa el rendimiento, así como las opciones energéticas y alternativas de utilización siguen siendo limitadas.

13. Referencias

- Akinlabi, E., Anane-Fenin, K., Akwada, D. (2017). *Properties of Bamboo. Bamboo The Multipurpose Plant*. Springer International Publishing, Switzerland. pp. 87-149. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56808-9_3
- Añazco, M., & Rojas, S. (2015). Estudio de la cadena desde la producción al consumo del bambú (*Guadua angustifolia*) en Perú. Quito, Ecuador. 180 p. Recuperado de: <https://bambuecuador.files.wordpress.com/2018/01/2015-estudio-de-la-cadena-desde-la-producciocc81n-al-consumo-del-bmabucc81-en-ecuador.pdf>
- Añazco, M. (2013). *Estudio de la vulnerabilidad del bambú (Guadua angustifolia) al cambio climático en la costa del Ecuador y norte Perú*. Quito, Ecuador. 135 p. Recuperado de: <http://www.keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Impacto/7.pdf>
- 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
- Bamonte, G., & Kociancich, S. (2007). *Los Ese Ejja: El mundo de los hombres y el mundo de los espíritus entre los indios del río*. La Paz, BO, Plural Editores. 209 p.
- Banik, RL. (2015). Morphology and growth. In: Liese W, Kohl M (eds) *Bamboo: the plant and its uses*. Springer International Publishing, Switzerland, pp. 43–87.
- Botero C., Luis F., (2012). *Reproducción de la Guadua angustifolia Kunth por el método de chusquines*. Ecuador, International network for bamboo and rattan (INBAR).
- Buckingham, K., Jepson, P., Wu, L., Ramanuja Rao, I. V., Jiang, S., Liese, W., Lou, Y., & Fu, M. (2011). The potential of bamboo is constrained by outmoded policy frames. *Ambio*, 40, 544-548. <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0138-4>
- Casanova, F. (2018). *Determinación de medios de cultivo para el establecimiento in vitro de bambú Guadua weberbaueri*. Tesis Ingeniero Forestal Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 82 p.
- Castaño, F., & Moreno, R. (2004). *Guadua para todos. Cultivo y aprovechamiento. Proyecto manejo de bosques de Colombia*. Corporación Autónoma Regional de Risaralda. Bogotá, Colombia.

- Catpo, J. (2017). *Etnobotánica, caracterización morfológica y distribución ecológica de especies de bambú en la Región Selva Central del Perú*. Tesis Mg. Sc. Conservación de Recursos Forestales. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 128 p.
- 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. (2019). Caracterización química y física del bambú. *Revista avances en Ciencias e Ingeniería*, 10(4): 1-13.
- Césare, M.F., Titto, J.L., Paucar, R., Calle, J.L. (2019). Bambú en Perú. En Universitat Politècnica de València (Ed.). *Optimización de los procesos de extracción de biomasa sólida para uso energético (Iberomasa)*. pp. 63-87. CYTED. <http://www.cyted.org/es/biblioteca/optimizaci%C3%B3n-de-los-procesos-de-extracci%C3%B3n-de-biomasa-s%C3%B3lida-para-uso-energ%C3%A9tico>.
- Corrales, (2018). Establecimiento *in vitro* del Bambú *Guadua angustifolia* Kunth bajo seis tratamientos de desinfección aplicados en segmentos nodales procedentes de ramas primarias. *BAMBUCYT. Bambú para la ciencia, innovación y tecnología*. (1): 16 -19
- Corporación Autónoma Regional del valle del Cauca. (2016). Curso Taller. Propagación de bambú *Guadua angustifolia*. La Molina, Perú. 34 p.
- Centro de Investigación Capacitación, Asesoría y Promoción [CICAP] (2008). "Manual: Manejo técnico de la caña de guayaquil (*Guadua angustifolia*)". Chiclayo-Perú.
- Cole, T., Hilger, H. (2010). APG III (en línea). St. Louis, US. Missouri Botanical Garden. Disponible en <http://www2.biologie.fuberlin.de/sysbot/poster/poster1.pdf>.
- Darabant, A., Haruthaithanasana, M., Atklaa, W., Phudphonga, T., Tanavata, E., & Haruthaithanasana, K. (2014). Bamboo biomass yield and feedstock characteristics of energy plantations in Thailand. *Energy Procedia* 59 (2014): 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.359>
- Dávila, K. (2012). *Evaluación del estado de conservación de la caña guadua (Guadua angustifolia Kunth) en la cuenca alta de las riberas del río Portoviejo*. Tesis, Ingeniero en Gestión Ambiental. Portoviejo, Ecuador. Universidad Técnica Particular de Loja. pp. 20-22.
- DGFFS-INRENA. *Producción de Productos Forestales No Madereros: períodos 1995-2013*. (2014). www.inrena.gob.pe / Estadísticas Forestales.
- Engler, B., Schoenherr, S., Zhong, Z., Becker, G. (2012). Suitability of Bamboo as an Energy Resource: Analysis of Bamboo Combustion Values Dependent on the Culm's Age, *International Journal of Forest Engineering*, 23 (2012). <https://doi.org/10.1080/14942119.2012.10739967>
- Estrada, M. (2010). *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua angustifolia) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos*. Lima, Perú.
- Fernández, J. (2012). Sierra Exportadora. "Perspectivas para la industrialización de bambú en las regiones de la sierra del Perú". (en línea) Consultado 15 jul. 2016. Disponible en: www.sierraexportadora.gob.pe
- Giraldo, E., & Sabogal, A. (1999). *Una alternativa sostenible: la Guadua técnicas de cultivo y manejo*. CRQ, 192 p.

- González, H. (2005). *Elaboración de una propuesta para el aprovechamiento y la transformación del bambú en el ámbito del PRODAPP (Puerto Inca Oxapampa)*.
<http://www.keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/GRFFS/35.pdf>
- Gonzales, E. (2004). *El bambú en Perú*. 2da Reunión de Difusión Regional, Proyecto Participativo de un Modelo Participativo para replicar la pobreza en base al bambú en los países andinos. Guayaquil: SNV-INBAR
- 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>
- Hidalgo, O. (1974). *En Bambú, su cultivo y aplicaciones en: fabricación de papel, construcción, arquitectura, ingeniería y artesanía*. (p. 318). Bogotá, CO.: Estudios Técnicos Colombianos.
- 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. (2014). *El bambú: un recurso estratégico para que los países reduzcan los efectos del cambio climático*. Recuperado de <https://bambuecuador.files.wordpress.com/2018/01/2014-el-bambucc81-un-recurso-estrategico-para-que-los-paices-reduzcan-los-efectos-del-cambio-climatico.pdf>
- 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.
- Instituto Técnico de Capacitación [INTECAP]. (1990.) (a) Tecnología del cultivo de bambú. Departamento Agrícola, Misión de la República de China (Taiwán). ICTA. Guatemala, Guatemala. 35 p.
- Judziewicz, E., Clark, L., Londoño, X., & Stern, M. (1999). *American Bamboos*. Washington, US. Smithsonian Institution Press. 392 p.
- Kerlero de Rosbo, G (2012). Open ideas - electrical valorization of bamboo in Africa, in. J. de Bussy, *Open ideas - electrical valorization of bamboo in Africa*, in, Enea Consulting, Paris, 2012, p. 58.
- Kleinhenz, V., & Midmore, D.J. (2001). Aspects of bamboo agronomy, *Advances in Agronomy*, 74: 99-145. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(01\)74032-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(01)74032-1)
- Liese, W., Kohl, M. (2015). Bamboo, *Tropical Forestry* 10. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6>
- López V.A., Sterrett, W.R., & McDonald, M.J. (1987). Árboles comunes del Paraguay: Ñande yvyra mata kuera. En W. R. J Alberto López Villalba, *Árboles comunes del Paraguay: Ñande yvyra mata kuera* (p. 425). Cuerpo de Paz: Colección e Intercambio de Información.
- Londoño, X. (2012). *Evaluation of bamboo resources in Latin America*. A summary of the final Report of Project N° 96-8300-01-4 (en línea) INBAR. CO. Recuperado de: http://www.inbar.int/wpcontent/uploads/downloads/2012/09/inbar_working_paper_no33.pdf
- 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>.

- Londoño, X. (2010). *Identificación taxonómica de los bambúes de la región noroccidental del Perú*.
- Londoño, X. (2006). Botánica y diversidad genética de la *Guadua* y otros bambúes de América. *III Simposio Latinoamericano de Bambú. Bambú, comunidad y desarrollo*. Guayaquil, Ecuador.
- Londoño, X. (2005). Aspectos generales de los bambúes americanos. *Primer Congreso Mexicano del bambú*. México.
- Londoño, X. (2002). *Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del nuevo mundo. Módulo Guadua*. Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá. Recuperado: <http://www.maderinsa.com/guadua/taller.html>
- Londoño, X. (1998). *Evaluation of Bamboo Resources in Latin America*. Final Report Projecc 96-8300-01-4, INBAR.
- Londoño, X., & Peterson, P. (1991). *Guadua sarcocarpa* (Poaceae: Bambuseae), a New Species of Amazonian Bamboo with Fleshy Fruits. (en línea) *Systematic Botany*. 16(4): 630-638. <https://doi.org/10.2307/2418866>
- Londoño, X. (1990). *Estudio botánico, ecológico, silvicultura, económico e industrial de las Bambusoideae de Colombia*. Colombia. 78 p.
- Londoño, X. s.f. Recurso sostenible de incalculable valor. In Villegas, M. *Guadua: Arquitectura y Diseño*. Villegas. S.l. 213 p. (en línea) Consultado 20 mar. (2016). Disponible en: books.google.com.pe.
- Marulanda, M., Gutiérrez, L., & Márquez, M. (2005). Micropropagación de *Guadua angustifolia* Kunth. (en línea). *Revista Colombiana de Biotecnología Vegetal*, 27(82) Consultado 13 mar. 2016. Disponible en: <http://matematicas.udea.edu.co/~actubiol/Vol27-82Resumen.htm>
- Mercedes, J.R. (2006). *Guía Técnica Cultivo del Bambú*. Santo Domingo, República Dominicana. CEDAF, 2006. 38 p.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador-MAG. (2004). Servicio de información agropecuaria (en línea). Recuperado de: <http://www4.congreso.gob.pe/historico/cip/materiales/bambú/doc2.pdf>
- Ministerio de Agricultura - MINAN. (2008). Plan Nacional de Promoción del bambú 2008 - 2020 (2da ed.). Lima. Recuperado el 22 de abril de 2020, de <https://www.serfor.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Plan%20Nacional%20del%20Bambu.pdf>
- Montaño, C.M.D, Pels, J.R., Fryda, L.E., & Zwart, R.W.R. (2012). Evaluation of torrefied bamboo for sustainable bioenergy production, in: J. Gielis (Ed.) *9th World Bamboo Congress*, World Bamboo Organization, Antwerpen, 2012, pp. 809-818.
- Morán, J. (2001). *Usos tradicionales y actuales del bambú en América Latina, con énfasis en Colombia y Ecuador*. ECUABAMBU, INBAR, PNUD, Escuela Politécnica Nacional. Guayaquil.
- Móstiga, M.J. (2019). *Propagación in vitro de germoplasma de Guadua weberbaueri Pilg. colectado en tres sitios de selva central*. Tesis para optar el grado de Mg. Sc. Conservación de Recursos Forestales. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 124 p.

- Móstiga, RC., Cano BG, Quispe, LR., Móstiga, MJ. (2018). Análisis morfológico y molecular de especies de bambú del género *Guadua* (Poaceae: Bambusoideae) procedentes de las regiones San Martín y Cajamarca, Perú. *Rev. de investig. Agroproducción sustentable* 3(1): 83-91, 2019. <https://doi.org/10.25127/aps.20191.486>
- Nelson, B. (1994). Natural forest disturbance and change in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing Rev.*, 10: 105-125. <https://doi.org/10.1080/02757259409532239>
- Ohenberger, O. (1999). *Los bambúes del mundo. Nomenclatura Anotada y literatura de las especies y la taxa superior e inferior*. Editorial Elsevier. 596 p.
- Ortiz, K. (2018). Caracterización y clave de identificación de los bambúes en la región nor-oriental (San Martín, Amazonas y Cajamarca). *BAMBUCYT. Bambú para la ciencia, innovación y tecnología*. (1): 26 -28
- Organización Internacional de las Maderas Tropicales [OIMT]. (1995). *Bambú para la vida: alternativa para la rehabilitación de tierras forestales degradadas y el desarrollo rural sostenible en la región amazónica del Perú*. Recuperado de: http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/3130/Project/PD%20690-13%20Rev.pdf
- Paucar, R., & Llerena L. (2018). Manual técnico de la caña Guayaquil (*Guadua angustifolia*): Sistematización de experiencias en la Región Piura. Recuperado de: <http://repositorio.serfor.gob.pe/handle/SERFOR/523>
- Pérez, DV., & Ríos, PC. (2019). *Influencia del diámetro de esquejes para la propagación vegetativa de bambú guadua (Guadua angustifolia Kunth) a nivel de vivero en Chanchamayo*. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. La Merced, Perú. Recuperado de: http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/1917/1/T026_43247136_T.pdf
- Reátegui, N. (2009). *Caracterización y Clave de Identificación de Bambúes en el ámbito Chanchamayo, Departamento de Junín, Perú*. Tesis Lic. Ing. For. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Scurlock, J.M.O., Dayton, D.C., & Hames, B. (2000). Bamboo: an overlooked biomass resource?, *Biomass and Bioenergy*, 19: 229–244. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00038-6](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00038-6)
- Stahl, R., Heinrich, E., Gehrman, H.J., Vodegel, S., & Koch, M. (2004). Definition of a standard biomass, in, *Forschungszentrum Karlsruhe*, Karlsruhe, p. 14
- Seboka, Y. (2010). *Bamboo charcoal & charcoal briquette production manual*. Ethiopia: INBAR-NPMU.
- Sustenta. Inventario de Bambú en el Perú. Reporte de inventario, Lima: GTZ Contrato 01.2459.4-001.00/PI-030/03., 2003, 50
- Takahashi, J., & Ascencios, D. (2004). *Inventario de Bambú en el Perú*. Informe final. Lima, Perú.
- Takahashi, J. (s/f). *El bambú y su potencial para el desarrollo sostenible en el Perú*. Recuperado de: https://www.agrobanco.com.pe/pdf_cpc/bambu_josefinatakahashi.pdf
- Trillo, N. (2019a). Ponencia Cadena de valor del Bambú. Emprendimientos de la mujer en actividades productivas forestales en el marco del cambio climático. Colegio de Ingenieros del Perú Capítulo Ingeniería Forestal.
- Trillo, N. (2019b). Ponencia de propagación de bambúes en la amazonía del Perú, 1er. *Congreso Internacional del bambú*, Chanchamayo.

- Truong, A.H., & Le, T.M.A. (2014). *Descripción general de la biomasa de bambú para la producción de energía*. Hanoi: USTH.
- Uchimura, E. (1980). Bamboo cultivation, in bamboo research in Asia (1980, Singapore), proceeding of a workshop held in Singapore. Otooowa – Canada. International Development Research Center, p. 135.
- Valdez, (2013). *Manual para el cultivo de experiencias en Guatemala*.
- Vorontsola, M.S., Clark, L.G., Dransfield, J., Govaerts, R., & Baker, W.J. (2016). *World checklist of bamboos and rattans*. Recuperado: https://issuu.com/inbarlac.media/docs/bamboo_checklist
- Xu, T.S., & Wang, H. (2004). *Main pests of bamboo in China*. Chinese Forest Publish House, Beijing, pp 45–46.
- Zhang, Q., Jiang, S., & Xiao, P. (2002). *Transfer of technology model, Bamboo charcoal unit*. Nanjing, China: International Network for bamboo and rattan (INBAR).
- Zhou, C., Wu, X.Q., Ji, J., & Ye, J.R. (2010). Research advances of bamboo diseases. *China For Sci Technol*, 24(5):8–13.

Current Status of Sugarcane (*Saccharum* spp.) Breeding under Sustainable Conditions in Argentina

Alberto Acevedo^{1*}, Catalina Molina¹, José María García²,
María Laura Federico² y Luis Erazzú³

¹Institute of Soils, National Institute of Agricultural Technology (INTA), Castelar, Buenos Aires, Argentina.

²National Council of Scientific and Technical Research (CONICET) and Agricultural Experimental Station of Famaillá (INTA), Famaillá, Tucumán, Argentina.

³Agricultural Experimental Station of Famaillá (INTA), Famaillá, Tucumán, Argentina.

*Corresponding Author: acevedo.alberto@inta.gob.ar

1. Introduction

Sugarcane belongs to the genus *Saccharum*, to the family Poaceae (or Gramineae), subfamily Panicoideae, tribe Andropogoneae, subtribe Sacharinae, group Saccharastrae. It is the most important sugar crop and the second bioethanol crop in Argentina. Sugarcane production for the 2018/19 marketing year hit 21.5 million tons in the country. While 16.8 million tons of this amount was utilized for the production of sugar, 4.7 million tons was used for the production of first generation (1G) bioethanol (USDA GAIN report, 2019), the two main end-products of a non-vertically integrated sugar and ethanol supply chain that generates exchanges between different companies, i.e., growers on one side and millers in the other (Acreche & Valeiro, 2013). National production of sugar for the 2018/19 marketing year reached 1.66 million tons (raw value). Of this amount, human domestic consumption accounted for 1.57 million tons and 187,000 tons were exported (USDA GAIN report, 2019). Production of 1G bioethanol by fermentation of sugarcane juices or molasses hit 528,162 m³ for the 2018/19 marketing year, representing 47% of the national production of 1G bioethanol (Secretaría de Gobierno de Energía, 2019).

The processing of satellite images demonstrated that sugarcane covered 376,223 hectares during 2018 in Argentina (Benedetti, 2018). Tucumán, the province with a sugarcane planted area of 273,737 hectares represented 73% of the total planted area, followed by the provinces of Salta and Jujuy, and to a minor extent by the provinces of Misiones and Santa Fe (Figure 1).

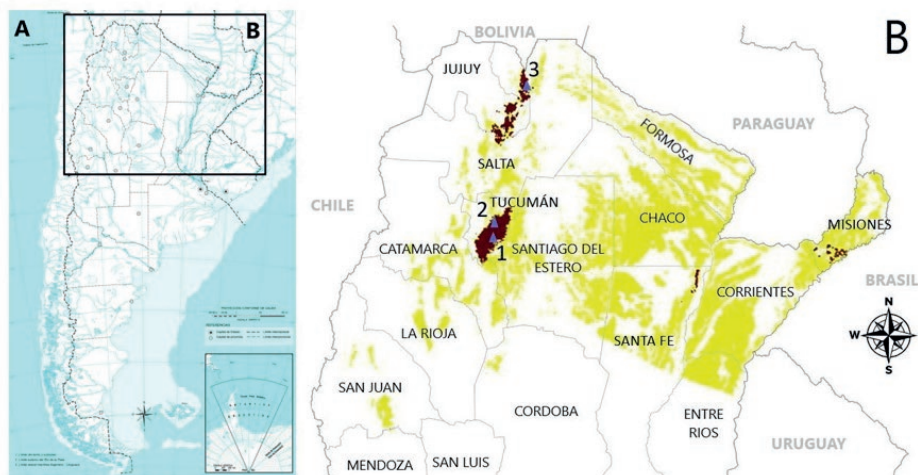


Figure 1. Present and potential sugarcane cultivation areas in Argentina. **A:** Argentina. **B:** Northern Argentina: potential sugarcane expansion area (yellow), sugarcane cultivated area in 2018 (brown) and breeding stations (1: Famaillá Agricultural Experimental Station of the National Institute of Agricultural Technology, 2: Obispo Colombres Experimental Station of Tucumán Province, 3: Santa Rosa Agricultural Experimental Farm). Modified from Anschau & Acevedo (2013) and Benedetti (2018).

In accordance with the underscored role of Tucumán in sugarcane productive chain, 15 out of 22 national sugar mills are located in this province (Ministerio de Hacienda, 2018). An increasing number of sugar mills produce 1G bioethanol as well (11 in Tucumán: Bella Vista, Concepción, Famaillá, La Corona, La Florida, La Trinidad, Leales, Marapa, San Juan, Santa Bárbara y Santa Rosa; 2 in Salta: Alconoa S.R.L., and Bio San Isidro S.A.; and 2 in Jujuy: Bio Ledesma S.A., and Río Grande) (Ministerio de Hacienda, 2018; Ortiz, 2018).

In Argentina, sugarcane is the second feedstock for bioethanol production behind corn. However, its high biomass production allows three other possible energy uses. The production of coal briquettes from agricultural crop residue (ACR) is one of them. Following mechanized harvest, approximately 15 tons (fresh weight)/ha of ACR remain in the field. In Tucumán alone, gross supply of ACR reaches 4.1 million tons, suggesting that 50% of ACR could be collected and subsequently processed, leaving in situ the other half for soil sustainability. Assuming 15% yield in the carbonization process, this means that it would be feasible to produce 307,954 tons of charcoal briquettes (Ullivari et al., 2011; Benedetti, 2018). A second energy use derives from the utilization of the bagasse, a by product of the sugar industry, for cogeneration of energy in the boilers of the sugar mills (Kumar et al. 2008, BABETHANOL, 2013). The excess of energy produced by the sugar industry is equivalent to 100 MW and is delivered to the Argentine energy sector (INTA, 2017). Bagasse can also serve as lignocellulosic feedstock for the production of second generation (2G) bioethanol (Loureiro et al., 2011). Even though this third alternative represents, in comparative terms, a promising and advantageous option, it is not currently employed in the country (Acevedo

et al., 2017). However, within the conceptual framework of a biorefinery, this energy use could complement other industrial uses, as the production of sugar and 1G bioethanol.

It has been estimated that almost 7.7 million hectares could be potentially cultivated with sugarcane in Argentina (Carballo et al., 2009) (Figure. 1). This potential expansion raises some issues that need to be assessed, and sustainability appears as a major one. To address society's concerns regarding the sustainability of sugar and ethanol production and use, the energy and greenhouse gas (GHG) emission balances of a non-vertically integrated sugarcane industry in Tucumán, were calculated (Acreche & Valeiro, 2013). As a result, an industry energy balance of a 3.4:1 ratio was obtained. The calculated GHG emissions during the agricultural stage were 1824 and 2231 kg CO₂eq. ha⁻¹ year⁻¹ for low and middle to high farms' technological levels (M-HTL), respectively. This means that for each unit of energy consumed, almost three and half units of energy are obtained in sugar and ethanol equivalents for M-HTL, (considering the most representative farms' technological level; M-HTL). The mill process emitted 1187 kg CO₂eq. ha⁻¹ year⁻¹. The most important factors influencing these balances were natural gas consumed by the sugar mill, gas-oil and nitrogen fertilizers used in the field, and the sugarcane burning practice which represented more than 20% of total emissions. It is worth mentioning that the 3.4:1 energy balance ratio could be increased up to a 7.3:1 ratio if 100% bagasse is used as energy source and the mill only produces bioethanol and no sugar. In addition, several other intermediate situations could also improve the current efficiency ratio (Acreche & Valeiro, 2013).

2. Sugarcane breeding in Argentina

2.1 Breeding Programs and Traits of Interest

Genetic improvement of sugarcane in Argentina is performed by three main breeding programs: Famaillá Agricultural Experimental Station of the National Institute of Agricultural Technology (INTA, Spanish acronym), Obispo Colombres Experimental Station (EEAOC, Spanish acronym), and Santa Rosa Agricultural Experimental Farm (CEASR, Spanish acronym) (Figure. 1). The first two programs are located in the province of Tucumán and receive national (INTA) and provincial (EEAOC) financial support, while the third one is located in the neighbor province of Salta and depends on private funding (Figure. 1).

INTA's sugarcane breeding program aims at providing the Argentinean agroindustry with cultivars well adapted to predominant subtropical conditions. INTA also administers the National Germplasm Bank for sugarcane, which primarily contains subtropical genetic materials. Breeding objectives of this national program currently include the improvement of the productive potential, industrial quality for different applications (with emphasis on sugar yield and fiber content for bioenergy) and resistance to biotic and abiotic factors (García et al., 2019; Fontana et al., 2019; Tesouro et al., 2019).

Briefly, stages dealing with the decision process leading to the release of a high-yield sugar cultivar starts with the germination of true seed - derived from biparental crosses performed either at Famaillá Agricultural Experimental Station or overseas - at the greenhouse and seedling transplantation into the field. Subsequently, a selection scheme based on 6 stages is applied and the entire process takes 12 to 15 years until a new cultivar is

released (Figure 2). Since 2008, genotypes selected at stage 3 are also evaluated at INTA's Sugarcane Trial Network. This net is comprised by INTA's Agricultural Experimental Stations, extra INTA institutions and private companies and is aimed at developing cultivars adapted to current and potential areas of sugarcane production in Argentina.

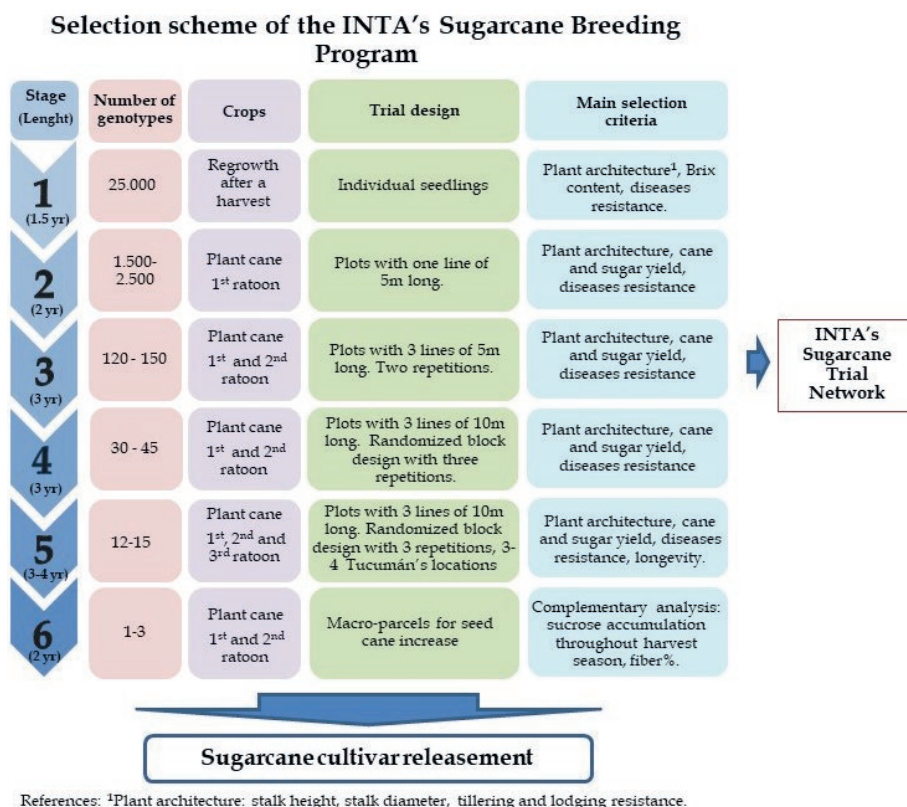


Figure 2. Selection scheme of the INTA's Sugarcane Breeding Program.

EEOC's sugarcane breeding program main purpose is to produce new cultivars with higher sugar, ethanol and biomass yields in order to improve agroindustry productivity in Tucumán. (EEOC, 2017) Development of transgenic cultivars resistant to glyphosate and *Diatraea saccharalis*, and detection of molecular markers associated to *Puccinia melanocephala* resistance are also among their objectives (Noguera et al., 2019; Perera et al., 2019; Racedo et al., 2019)

CEASR is aimed at breeding and developing sugarcane cultivars adapted to Argentina northwestern agroecological conditions. In vitro propagated plants as commercial seeds for sugarcane producers has become an underlying service provided by CEASR, as well as breeding sugarcane cultivars resistant to sugarcane mosaic virus. More recently, CEASR

has focused on investigations dealing with the agronomic and compositional characterization of a glyphosate-tolerant transgenic event derived from sugarcane cultivar NA05-2019 (Romero et al., 2019).

2.2 Conventional Breeding

Six species integrate the genus *Saccharum* (*S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. robustum*, *S. barberi*, *S. edule*, and *S. sinense*), all being polyploid with ploidy levels ranging between 5x and 16x (Santchurn, 2010). The last three species are likely of natural inter-specific and/or inter-generic origin and should be probably relegated to horticultural group status (Daniels & Roach, 1987). Modern cultivars of sugarcane (*Saccharum* spp. Hybrids) have derived from crosses between *S. officinarum* ($2n = 8x = 80$; $x = 10$) and *S. spontaneum* ($2n = 5x = 40$ to $16x = 128$; $x = 8$) and have an inter-specific and aneuploid set of chromosomes (Bremer, 1961; Garsmeur et al., 2018). *S. officinarum* contributed with high sugar content, whereas *S. spontaneum* was used to incorporate disease resistance, adaptability and vigor (Brandes, 1956; Screenivasan et al., 1987). Several cytogenetic studies revealed that the nucleus of modern cultivars is composed of approximately 80% of chromosomes from *S. officinarum*, 10-20% of chromosomes from *S. spontaneum* and the rest of chromosomes resulting from the recombination between both species (D'Hont et al., 1996; Piperidis et al., 2001; Cuadrado et al., 2004). Depending on the cross that gives rise to a hybrid, the combination of chromosomes in each individual is unique and unpredictable (Grivet & Arruda, 2002).

Sugarcane cultivars are vegetatively propagated, while breeding is still basically focused on conventional methods since sugarcane genetics knowledge has lagged behind that of other major crops (Gouy et al., 2013). This is due to the interspecific, polyploid, and aneuploid nature of modern sugarcane cultivar genomes. In spite of the clearly complex genetic nature of sugarcane hybrids, breeding (and management) programs around the world have successfully increased sugar yield through the selection of its main yield components, cane yield and sugar content. In Argentina, sugarcane breeding achievements since 1940 were evaluated during three growing seasons under rainfed field conditions in Tucumán through the identification of the physiological bases behind observed genetic gains (Acreche et al., 2015). Well in accordance with previous results obtained in other countries, it was determined that genetic gains for sugar yield were 0.08 and 0.14 Mg ha⁻¹ y⁻¹ for plant and ratoon cane, respectively (Acreche et al., 2015). Linear increases in sugar yield, cane yield, sugar content and average stem weight were found with increasing cultivar release year (1940 to 2010). Breeding also positively affected the total above ground dry biomass and dry stem weight. Surprisingly, no increase on the partitioning of total above ground dry biomass to sugar or stems was found. This is consistent with released cultivars in Argentina not reaching a plateau in sugar yield yet (Acreche et al., 2015). Some characteristics of the main cultivars currently grown in Argentina are summarized in Table 1.

Table 1. Cultivated region, progenitors, and agricultural features of the main sugarcane cultivars grown in Argentina.

Cultivar	Cultivated region	Progenitors	Agricultural features
¹ LCP 85-384	Tucumán	CP 77-407 x CP 77-310	High sucrose and cane yield, early maturing, medium fiber and flowering; resistant to smut, mosaic, and red stripe; susceptible to leaf scald and brown rust.
¹ TUCCP 77-42	Tucumán	CP 71-321 x US 72-019	High sucrose and cane yield, mid maturing, heavy flowering, medium fiber; resistant to smut, mosaic, and red stripe; susceptible to leaf scald, and brown rust
² TUC 95-10	Tucumán	CP 72-370 x CP 57-614	High sucrose and cane yield, early maturing, medium fiber; resistant to mosaic, smut and red stripe; medium resistant to leaf scald and brown rust.
³ NA 97-3152	Northern Argentina	NA 78-2186 x Polycross	High sucrose and cane yield, mid-late ripening, medium fiber, low flowering; resistant to smut, and red stripe; susceptible to leaf scald, brown rust, and mosaic.
³ NA 90-1001	Northern Argentina	SP 70-1143 x NA 76-128	Medium sucrose, high cane yield, mid-late maturity, medium fiber, medium flowering; resistant to mosaic, and red stripe; susceptible to smut, leaf scald, and brown rust.
³ CP 70-1133	Northern Argentina	Unknown x Unknown	Medium sucrose, high cane yield, mid maturity, medium fiber, low flowering; susceptible to mosaic.
³ NA 96-2929	Northern Argentina	SP 70-1143 x Polycross	Medium sucrose and fiber, high cane yield, mid-late ripening, heavy flowering; resistant to mosaic; susceptible to smut, leaf scald, brown rust, and red stripe.

Sources: ¹Acevedo et al., 2017. ²Cuenya et al., 2011. ³Data gently provided by Santa Rosa Agricultural Experimental Farm's Breeding Program.

The genealogies of 16 sugarcane cultivars belonging to the breeding program of the Agricultural Experimental Station of Famaillá (INTA) have been recently reconstructed (Acevedo et al., 2017). The cultivars have two origins (9 Argentinians, AR, and 7 Americans, AM) and exhibit average kinship coefficients of 0.206 ± 0.054 . The study indicated that three founding species of the genus *Saccharum* are present in all 16 pedigrees (*S. officinarum*, *S. barberi* and *S. spontaneum*), *S. sinensis* is present in 13 pedigrees and *S. robustum* in only 3 (Acevedo et al., 2017). It also became clear that LCP 85-384, the cultivar that occupies more than 75% of the land cultivated with sugarcane in Tucumán, has received genes from 3 cultivars of sorghum (*Sorghum bicolor*) with high sugar content (Acevedo et al., 2017). In addition, the industrial parameters analyzed in the 16 cultivars indicated that AR and AM cultivars were preferably selected for high sucrose content and sugar yield, exhibiting low fiber content. This is consistent with the 16 reconstructed genealogies, where *S. officinarum* genetic background is present in greater proportion and the fact that there were no clones of *S. spontaneum* (high fiber content) in the generations immediately prior to hybrid selection (Acevedo et al., 2017).

Therefore, breeding for higher fiber content will require the exploitation of available high fiber sugarcane clones and/or the discovery of new sources of variability.

The limited participation of founding species in the genealogies of AR and AM cultivars not only reveals the narrow source of sugarcane germplasm employed in breeding these cultivars (Acevedo et al., 2017), but also highlights a major concern because since 2004/2005 more than 44% of the sugarcane planted area in Tucumán has been occupied by LCP 85-384. A detailed evolution of the percentage area occupied by main sugarcane cultivars from 1977/1978 to 2016/2017 growing seasons is shown in Figure 3. Hopefully, a decline in LCP 85-384 cultivated area was observed during 2016/2017 growing season. Sugarcane cultivars recently released are expected to diversify availability of sugarcane germplasm in the market and diminish the risk derived from having few genotypes occupying almost all the sugarcane cultivated area (La Gaceta, 2017; Ostengo et al., 2018).

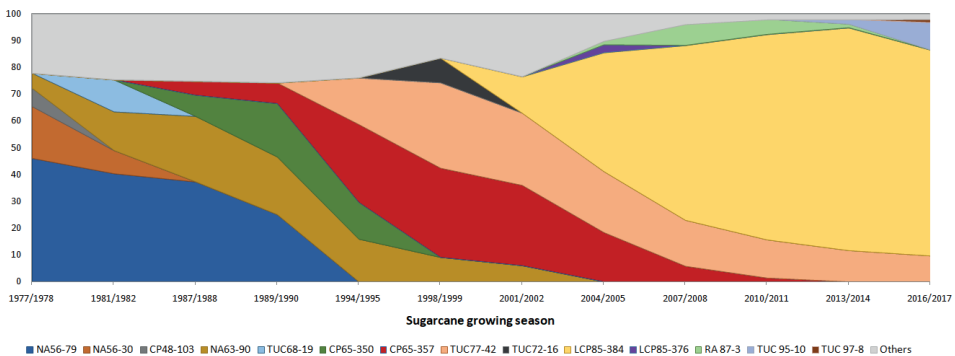


Figure 3. Percentage area occupied by main sugarcane cultivars in Tucumán from 1977/1978 to 2016/2017 growing seasons. Sources: Ahmed et al. 2007; Cuenya et al., 2009; Ostengo et al., 2012; Ostengo et al., 2015; Ostengo et al., 2018.

2.3 Advanced Breeding Technologies

The sugarcane genome is not only complex because of its polyploid nature and its various chromosomal combinations but also for its size. It is estimated that this genome is 10 Gb long (Souza et al., 2011) and that of the non-replicated somatic cell (2C) is 7440 Mb (Borém et al., 2015). In addition, homologous gene families could contain 8 to 12 members (Souza et al., 2011). Undoubtedly, this complexity and redundancy have hindered and sluggish the development of molecular tools, and delayed the sequencing and assembly of the sugarcane genome (Figueira et al., 2012).

The genetic improvement of sugarcane based on advanced breeding strategies, either with molecular markers or transgenesis, will greatly benefit from the recent elucidation of its monoploid genome sequence and gene (and protein) complement (Garsmeur et al., 2018, De Siqueira Ferreira et al., 2013). Fortunately, the genome of a close diploid species like sorghum is relatively small (730Mb, 34,496 genes) and has been sequenced for almost a decade (Paterson et al., 2009; McCormick et al. 2018). In addition, the level of

conservation in the order of genes, i.e. collinearity, is high between sorghum and sugarcane in regions that have high gene density (Wang et al., 2010). In fact, the international initiative that recently published the first monoploid reference genome of the R570 cultivar used the sorghum genome sequence for mapping and assembling sugarcane reads. A total of 25,316 protein-coding gene models were predicted, 17% of which displayed no collinearity with their sorghum orthologs (Garsmeur et al., 2018).

Over the years, the study of the sugarcane genome has been favored by the development of molecular markers (RFPL, RAPD, AFLP, SSR and EST) that allowed for the construction of genetic maps, diversity studies, comparative genomics and quantitative trait loci (QTL) mapping (Thirugnanasambandam et al., 2018). Molecular markers have also become increasingly important for identifying genotypes and estimating diversity, as they are accurate, readily available, and are not affected by the environment. However, these markers have low-to-medium throughputs, which lead to low coverage in large genomes such as sugarcane (Fickett et al., 2018). Perera et al. (2012) evaluated sugarcane hybrids used as progenitors in the EEAOC's Sugarcane Breeding Program by using molecular markers (AFLP and SSR) and morphological traits. Authors concluded that Argentine hybrids grouped together with US-varieties and no clear genetic differentiation was found, probably due to regular germplasm exchange. They further stated that molecular markers should be included internationally for sugarcane cultivar protection.

The advances in molecular biology, especially in DNA sequencing supported by bioinformatics and high-performance computing, have represented a powerful tool for the identification of species traits (de Carvalho et al., 2019). The application of this technology has focussed on the discovery of new genes and conserved regions and their association with biosynthesis pathways in cell wall, or its components (Calviño et al., 2008; Vermerris et al., 2011). Analyzing the entire genome through sequencing techniques may help improving the comprehension of the genome organization and structure (de Carvalho et al., 2019) and this information may be useful in future breeding programs.

With the implementation of next generation sequencing technologies (NGS) more efficient molecular markers like single nucleotide polymorphisms (SNPs) could be developed (Ganal et al., 2009; Clarke et al., 2013). In polyploid crops such as sugarcane, the great advantage of SNPs over other types of markers is their codominant behavior, their distribution, abundance in the genome, and the possibility of determining the number of copies for each allele (marker dosage) (García et al., 2013). Its implementation provides higher resolution and more saturated genetic maps. Given the large size of the sugarcane genome, genetic maps not developed with SNP markers did not provide adequate coverage. It is estimated that they only represented between 33 and 50% of its genome (Mancini et al/ 2017). Advanced breeding approaches, like QTL mapping and SNP-trait associations, help breeders investigate and incorporate genetic diversity (alleles) into their programs through gene mining from existing or newly developed sugarcane hybrids, as well as wild relatives. As previously mentioned, cultivars currently grown in Tucumán have high sugar content but are low in fiber (11-15%) (Table 1) (Acevedo et al., 2017). To maximize the conversion of bagasse into biofuel, it is necessary to develop sugarcane cultivars with high fiber that are at the same time easily degradable (Hoang et al., 2015). For this, not only biomass composition is being optimized, but also and simultaneously a business case for the implementation of industrial scale 2G ethanol plant is in progress in Tucumán (BABET-REAL 5, 2019).

INTA is currently developing genomic resources, both genotyping and phenotyping platforms, to support sugarcane breeding programs increase fiber content while avoiding any detrimental effects on sugar content or other agronomic traits. In this context, genotypes with cell-wall composition with improved biomass digestibility (high cellulose and low lignin contents) were identified in a sugarcane biparental population in spite of the minor differences observed between parental lines' cell-wall composition. The Van Soest method (Van Soest 1973) was used to determine cellulose, hemicellulose and acid detergent lignin contents (ADL), whereas spectroscopic acetyl bromide lignin (ABS) was determined, as well (Fukushima & Hatfield 2001). Because ADL and ABS assays showed no correlation, different genotypes could be selected according to the lignin method considered. These divergences suggest that further research is needed to validate lignin assessment as a bioenergy cultivar selection tool, e.g. complementary saccharification analyses. In addition, correlation analyses performed with major cell-wall polymers and agronomic traits revealed that bagasse of genotypes with higher stalk weights was associated with higher cellulose content and lower ADL content (García et al., 2019). Moreover, as an initial step towards the future discovery of SNPs in relevant regions of the sugarcane genome, comparative genomics with sorghum (*Sorghum bicolor*) was used to select genomic regions associated with biofuel production. This is deemed important in Argentina, where a growing demand for biofuels can be supplied not only by producing first generation (1G) but also second generation (2G) bioethanol from sugarcane. Using the Sorghum QTL Atlas and searching for metaQTLs and QTL clusters for eight traits of agronomic and industrial importance, with emphasis on the content of sugar and fiber, 21 metaQTLs associated with bioenergy traits were identified across nine linkage groups, corresponding to approximately 287 Mbp of genome sequence (Federico et al., 2019).

Sugarcane genome complexity has been the main reason why it is still unravelling (Thirugnanasambandam et al., 2018). To better study the characteristics of sugarcane hybrids, it is convenient to reduce the high level of complexity of their genomes in order to obtain high-quality polymorphism data (Balsalobre et al., 2017). Genotyping by sequencing (GBS) are methods that combine the reduction of genome complexity by using restriction fragment enzymes and NGS technology (Fickett et al., 2018). Among them, the double digest Restriction Associated DNA sequencing (ddRADseq) (Peterson et al, 2012), is probably the most promising technique to study biological diversity (López de Heredia, 2016). The novelty of ddRADseq is the use of two restriction fragment enzymes to digest the DNA, followed by a precise size selection of the fragments which is done to recover a library with solely fragments close to the target size (Figure. 4). Moreover, it can be used with little molecular information of the specie (Peterson et al, 2012). Once the sequencing is performed, the bioinformatic analysis consists of a quality control and pre-processing of the sequences obtained followed by a genome assembly with or without a reference genome (Figure 4). The use of a reference genome is based on the assumption that conserved regions of related species would provide tools for extending our knowledge of the genome under investigation (Thirugnanasambandam et al., 2018). The final aim is to call SNPs variants to perform genomic, evolutionary and ecological studies: analysis of QTLs, construction of genetic maps, allocation of paternity in natural populations, phylogeography, gene flow analysis, migration, association mapping, assisted selection and others (de Carvalho et al., 2019).

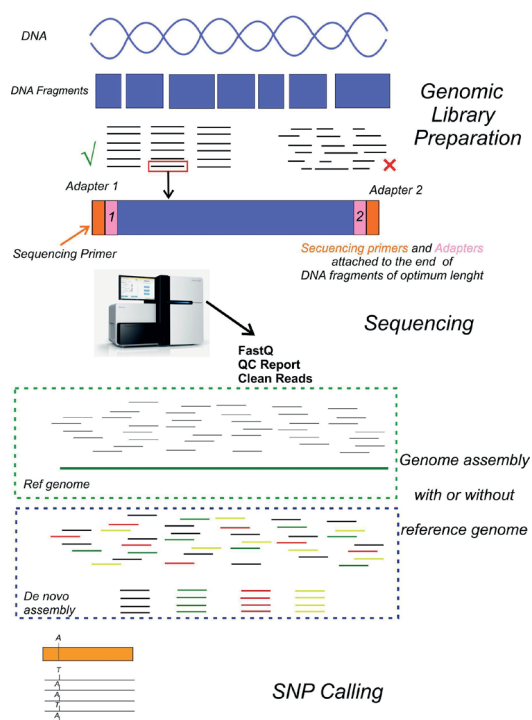


Figure 4. Genomic analysis workflow. From library preparation, through sample sequencing and genome assembly, to SNP detection.

Understanding genome origin of important agronomic and industrial traits would provide breeders with useful tools for the selection of genotypes with the desired phenotypes. In this respect, ddRADseq has become one of these effective tools. Despite this technology has been applied in Argentina to assist breeding programs of crops such as sunflower, sorghum (*S. halepense* and *S. bicolor*), plum, and eucalyptus (Aguirre et al., 2016; Aguirre et al., 2019), it had not been applied to INTA sugarcane breeding program until recently.

In this context, four commercial sugarcane cultivars belonging to INTA sugarcane breeding program have been genotyped as described by Aguirre et al. (2019), except for the digestion step where *Pst*I and *Mbo*I were used as restriction enzymes. A single end sequencing run of 75 bp was performed on NextSeq (Illumina Inc., San Diego, CA, USA). Even though the study is currently in progress, 50% of clean reads mapped to sugarcane monoploid (Garsmeur et. al, 2018), of which 40% aligned exactly only once. When sorghum BTx623 v 3.0 (McCormick et al. 2018) was used as the reference genome the alignment rate was 30%, of which almost 25% was uniquely mapped. Further analyses are needed to find SNPs related to agronomic traits of interest (Unpublished data).

In Argentina, molecular markers associated to cane yield and sugar content were detected in genotypes of the EEAOC Breeding Program using Diversity Array Technology

(DArT) and Target Region Amplified Polymorphism (TRAP) in a Genome-Wide Association Study (GWAS) approach (Racedo et al., 2016). Others groups around the world also applied NGS technologies to learn more about sugarcane genome (Table 2). Balsalobre et al. (2017) using GBS technology and four pseudo references discovered between 3,433 and 15,906 high-quality markers, depending on the pseudo reference. Furthermore, they found that QTLs to soluble solid content (BRIX) and fiber content (FIB) traits had markers linked to putative candidate genes. Likewise, GWAS conducted on the Louisiana sugarcane core collection identified GBS-derived SNPs and insertion-deletion (Indel) markers associated with cane yield components and sucrose traits (Fickett et al., 2018). Also through GWAS, 106 putative DNA markers and 107 genes were identified significantly associated with 10 fiber components of the cell wall in sugarcane, becoming the first investigation of molecular factors controlling the fiber composition of the cell wall in this species (Yang et al., 2019). In previous research, high-quality genome-wide SNPs, selected from target enrichment sequencing of 307 sugarcane germplasm accessions and used to perform population genomic studies and environmental association analysis, revealed that the ancient sugarcane hybrids, *S. barberi* and *S. sinense*, and modern sugarcane hybrids are significantly different in terms of genomic compositions, hybridization processes and their potential ancestry contributors. Moreover, 75 selective sweeps under natural selection and 1723 candidate genes involved in domestication and breeding selection were identified, as well as, 121 SNPs that landed in 106 gene regions associated with environmental variables. Overall, the identification of 4.65 million SNPs with high-confidence dosage resolution resulted in the compilation of a novel and comprehensive sequence variation database for *Saccharum* spp. that would have been difficult to achieve by using other NGS approach (Yang et al., 2018).

Table 2. Main programs in sugarcane genomics. Modified from Borém et. al (2015).

Institution / Network	Project Description	Country
Plant Genome Laboratory, State University of Campinas	Genomic studies: sugarcane BACs	Brazil
Mauritius Sugar Industry Research Institute (Msiri)	DNA fingerprinting of sugarcane cultivars and molecular diagnostic tests	Republic of Mauritius
The Plant Genome Data and Information Center (PGDIC) and the United States Department of Agriculture (USDA)	Sugarcane genomic map	United States
Organization of Nucleotide Sequence and Analysis (ONSA)	Sugarcane EST Genome Project (SUCEST). Identified 50,000 sugarcane genes	Brazil
Center for International Cooperation in Agricultural Research for Development (CIRAD)	Monoploid reference sequence for the sugarcane genome	France
Indian Institute of Sugarcane Research	Molecular study to reveal transcriptomes and genes associated with sucrose (GAS) transport and accumulation in sugar	India

3. Conclusions

Sugarcane cultivation in Argentina is an important agro-industrial activity for sugar and 1G bioethanol production in the northern region of the country, having the potential to diversify into 2G bioethanol production in extensive areas. Up until recently, sugarcane breeding in Argentina has been based on conventional methods but breeders are rapidly incorporating advanced technologies to tackle important objectives. Considering that sugar and bioethanol production has historically relied on the cultivation of a narrow set of hybrids, there is a clear need to widen genetic diversity. In order to diversify bioenergy production, improvement for higher fiber content in modern Argentine hybrids has become an important breeding objective. For this, advanced breeding technologies will prove useful during the discovery and mining sources of genetic variability.

Acknowledgments

We thank the field team of INTA's sugarcane breeding program for its technical assistance. The investigation was partially funded by grant from Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (PNAIyAV 2013-2016 No. 1130034 and PNIND N° 110801) and FONCyT (PICT 2016-1670) to AA.

4. References

- 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, Saez, J., Vera, J. (2015). Physiological bases of genetic gains in sugarcane yield in Argentina. *Field Crops Research*, 175 :80-86. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.02.002>
- 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
- Aguirre, N.C., Filippi, C.V., Zaina, G., Rivas, J.G., Acuña, C.V., Villalba, P.V., García, M.N., Scaglione, D., Morgante, M., González, S., López, J.A., López, A.J., Oberschelp, J., Harrand, L., Martínez, M.C., Puebla, A.F., Hopp, H.E., Rivarola, M., Paniego, N.B., Marcucci Poltri S.N. (2016). Desarrollo de una estrategia de genotipificación por secuenciación para el mejoramiento asistido de *Eucalyptus dunnii*. Development of a genotyping by sequencing strategy for assisted breeding of *Eucalyptus dunnii*. Pág. 65 a 68. *VII Reunión GeMFO, Trabajos Técnicos*, San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina, 24 al 26. Grupo de Genética y Mejoramiento Forestal. Juan Adolfo López; Luis Fernando Fornes; compilado por Juan Adolfo López; Luis Fernando Fornes. 1a ed. - Bella Vista: Juan Adolfo López, 2016. Archivo Digital, ISBN 978-987-42-1792-9. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34983.96167>.

- Aguirre, N.C., Filippi, C.V., Zaina, G., Rivas, J.G., Acuña, C.V., Villalba, P.V., García, M.N., González, S., Rivarola, M., Martínez, M.C., Puebla, A.F., Morgante, M., Hopp, H.E., Paniego, N.B., Marcucci Poltri S.N. (2019). Optimizing ddRADseq in Non-Model Species: A Case Study in *Eucalyptus dunnii* Maiden. *Agronomy*, 9: 484. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090484>
- Ahmed, M.A., Cuenya, M.I., García, M.B., Díaz Romero, C. (2007). Dinámica y características del recambio de variedades de caña de azúcar en Tucumán desde las primeras décadas del siglo xx hasta la actualidad. *Avance Agroindustrial*, 28(1): 17-22.
- Anschau, R.A, Acevedo, A. (2013). Agrofuels and water in Argentina. In: Dallemand JF, Gerbeens PE, editors. *Bioenergy and Water*, . p. 77-88.
- BABETHANOL (2013) *New feedstock and innovative transformation process for a more sustainable development and production of lignocellulosic ethanol*. Project reference: 227498 (FP7 2009-2013). Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/227498/reporting/es> [Accessed: 2020-4-20].
- BABET-REAL5. (2019). *3rd BABET-REAL5 workshop* (Taller Internacional Biocombustibles de II generación), 25 September 2019, Buenos Aires, Argentina. Available at: <https://www.babet-real5.eu/news-events/2-uncategorised/79-babet-real5-3rd-workshop-2.html> [Accessed: 2020-4-20].
- Balsalobre, T.W.A., da Silva, P.G., Margarido, G.R.A., Gazaffi, R., Barreto, F.Z., Anoni, C.O., Cardoso-Silva, C.B., Costa, E.A., Mancini, M.C., Hoffmann, H.P. (2017) "GBS-based single dosage markers for linkage and QTL mapping allow gene mining for yield-related traits in sugarcane". *BMC Genomics*, 18(1):72. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-3383-x>
- Benedetti, P. 2018. *Primer relevamiento del cultivo de caña de azúcar de la República Argentina a partir de imágenes satelitales para la campaña 2018*. EEA INTA Famaillá. Available at: <https://inta.gob.ar/documentos/primer-relevamiento-del-cultivo-de-canade-azucar-de-la-republica-argentina-a-partir-de-imagenes-satelitales-para-la-campana-2018>. [Accessed: 2020-4-20].
- Borém, A., Doe, J.A., Diola, V. 2015. Molecular Biology and Biotechnology. Sugarcane. Chapter 12. Elsevier *Agricultural Production, Bioenergy and Ethanol*, Pages 257-274. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802239-9.00012-8>. [Accessed: 2020-4-20]
- Bremer, G. (1961). Problems in breeding and cytology of sugar cane. *Euphytica*, 10: 59–78. <https://doi.org/10.1007/BF00037206>
- Brandes, E. Origin, dispersal and use in breeding of the Melanesian garden sugarcane and their derivatives, *Saccharum officinarum* L. *Proc. Int. Soc. Sugarcane Technol.*, 9: 709-750.
- Calviño, M, Bruggmann, R., Messing, J. (2008). Screen of genes linked to high-sugar content in stems by comparative genomics, *Rice*, 1: 166–176. <https://doi.org/10.1007/s12284-008-9012-9>
- Carballo, S., Flores Marco, N., Anschau, R.A., Hilbert, J. (2009). Argentine potentiality to develop sustainable bioenergy projects. Methodology to determine driving forces of land use changes using GIS tools. In: *Proceedings of energy sustainability*; 19-23 July 2009, San Francisco, California, USA. p. 1-13. Available at: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-asme_bioenergy.pdf [Accessed: 2020-4-20]

- Clarke, W.E., Parkin, I.A., Gajardo, H.A., Gerhardt, D.J., Higgins, E., Sidebottom, C., Sharpe, A.G., Snowdon, R.J., Federico, M.L., Iniguez-Luy, F.U.L. (2013). Genomic DNA enrichment using sequence capture microarrays: a novel approach to discover Sequence Nucleotide Polymorphisms (SNP) in *Brassica napus* L. *PLoS One*, 8: e81992. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081992>
- Cuadrado, A., Acevedo, R., Moreno Diaz De La Espina, S., Jouve, N., De La Torre, C. (2004). Genome remodelling in three modern *S. officinarum* x *S. spontaneum* sugarcane cultivars. *J. Exp. Bot.*, 55: 847-854. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh093>
- Cuenya, M.I., Ostengo, S., Chavanne, E.R., Espinosa, M.A., Costilla, D.D., Ahmed, M.A. (2009). Relevamiento de la distribución de variedades comerciales y de la aplicación de otras tecnologías en el área de cultivo de caña de azúcar de la provincia de Tucumán: campaña 2007–2008. *Gac. Agroindustrial EEAOC* (72).
- Cuenya, M.I., Chavanne, E.R., Ostengo, S., García, M.B., Ahmed, M., Costilla, D.D., Diaz Romero, C., Espinosa, M.A., Delgado, N., Diaz, J.V. (2011). TUC 95-10: Una variedad de caña de azúcar altamente productiva. *Gacetilla Agroindustrial*, 75: 1-16. Available at: <http://www.eeaoc.org.ar/publicaciones/categoria/20/218/Gacetilla-75.html> [Accessed: 2020-4-20]
- Daniels, J., Roach, B.T. (1987). Taxonomy and evolution in sugarcane. In: Heinz DJ (ed) *Sugarcane improvement through breeding*. Elsevier Press, Amsterdam, pp 77–84. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42769-4.50007-2>
- De Carvalho, L.M., Borellia, G., Camargo, A.P., de Assisa, M.A., de Ferraza, S.M.F., Fiamenghia, M.B., Joséa, J., Mofattoa, L.S., Nagamatsua, S.T., Persinotib, G.F., Silvaa, N.V., Vasconcelosa, A.A., Pereiraa, G.A.G., Carazzollea, M.F. (2019). *Biomass and Bioenergy* 123: 195–224. Elsevier 0961-9534. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.016>
- De Siqueira Ferreira, S., Nishiyama, M.Y.Jr, Paterson, A.H., Souza, G.M. (2013). Biofuel and energy crops: high-yield Saccharinae take center stage in the post-genomics era. *Genome Biol.*, 14: 210. <https://doi.org/10.1186/gb-2013-14-6-210>
- D'Hont, A., Grivet, L., Feldmann, P., Rao, S., Berding, N., Glaszmann, J.C. (1996). Characterisation of the double genome structure of modern sugarcane cultivars (*Saccharum* spp.) by molecular cytogenetics. *Mol. Gen. Genet.*, 250: 405-413. <https://doi.org/10.1007/BF02174028>
- EEAOC (2017). Informe anual 2017. ISSN: 1515-726. Page 17.
- Federico, M.L., Chakrabarty, S., Snowdon, R., Erazzú, L.E (2019) Sorghum to the rescue: use of comparative genomics for the study of bioenergy parameters in sugarcane. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, volume 30, 431–434, Tucumán, Argentina.
- Fickett, N., Gutierrez, A., Verma, M., Pontif, M., Hale, A., Kimbeng, C., Baisakh, N. Genome-wide association mapping identifies markers associated with cane yield components and sucrose traits in the Louisiana sugarcane core collection. *Genomics*, 111(6), 1794-1801, <https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2018.12.002>.
- Figueira, T., Okura, V., Rodrigues da Silva, F., da Silva, M.J, Kudrna, D., Ammiraju, J.S, Talag, J., Wing, R., Arruda, P. (2012). A BAC library of the SP80-3280 sugarcane variety (*Saccharum* sp.) and its inferred microsynteny with the Sorghum genome. *BMC Res. Notes*, 5: 185. <https://doi.org/10.1186/1756-0500-5-185>

- Fontana, P.D., Tomasini, N., Fontana, C.A., Di Pauli V., Cocconcelli, P.S., Vignolo, G.M., Salazar, S.M. (2019). Multilocus Sequence Analysis highlights genetic diversity of *Acidovorax avenae* strains associated with sugarcane red stripe. Reports and Abstracts of the *Proceedings of the XXX International Society of Sugar Cane Technologists Congress*, 31 August – 8 September 2019, Tucumán, Argentina. Edited by Peter G Allsopp. ISBN: 978-616-92761-0-4. Page 91.
- 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>
- Ganal, M.W., Altmann, T., Röder, M. (2009). SNP identification in crop plants. *Curr Opin Plant Biol.*, 12:211-217. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2008.12.009>
- Garcia, A.A.F., Mollinari, M., Marconi, T.G., Serang, O.R., Silva, R.R., Vieira, M.L.C., Vicentini, R., Costa, E.A., Mancini, M.C., MO, G., Pastina, M.M., Gazaffi, R., Martins, E.R.F., Dahmer, N., Sforça, D.A., Cardoso-Silva, C.B., Bundock, P., Henry, R.J., Souza, G.M., Van Sluys M.A., Landell, M.G.A., Carneiro, M.S., Vincentz, M.A.G., Pinto, L.R., Vencovsky, R., Souza, A.P. (2013). SNP genotyping allows an in-depth characterisation of the genome of sugarcane and other complex autopolyploids. *Sci Rep.*, 3: 3399. <https://doi.org/10.1038/srep03399>
- 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. *Reports and Abstracts of the Proceedings of the XXX International Society of Sugar Cane Technologists Congress*, 31 August - 8 September 2019, Tucumán, Argentina. Edited by Peter G Allsopp. ISBN: 978-616-92761-0-4. Pages 661–664.
- Garsmeur, O., Droc, G., Antonise, R., Grimwood, J., Potier, B., Aitken, K., Jenkins, J., Martin, G., Charron, C., Hervouet, C., Costet, L., Yahiaoui, N., Healey, A., Sims, D., Cherukuri, Y., Sreedasyam, A., Kilian, A., Chan, A., Van Sluys M-A, Swaminathan, K., Town, C., Bergès, H., Simmons, B., Glaszmann, J.C, van der Vossen, E., Henry, R., Schmutz, J., D'Hont, A. (2018). A mosaic monoploid reference sequence for the highly complex genome of sugarcane. *Nature Communications*, 9: 2638. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05051-5>
- Gouy, M., Nibouche, S., Hoarau, J.H, Costet, L. (2013). Improvement of yield *per se* in sugarcane. In: Varshney, R., Tuberosa, R., editors. *Translational Genomics for Crop Breeding: Abiotic Stress, Yield and Quality*. Wiley J. and Sons, Ames, Chichester and Oxford. 2013 Vol. 2, p. 211-237. <https://doi.org/10.1002/9781118728482.ch13>
- Grivet, L., Arruda, P. (2002) Sugarcane genomics: depicting the complex genome of an important tropical crop. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 5: 122-127. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(02\)00234-0](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(02)00234-0)
- Hoang, N.V., Furtado, A., Botha, F.C., Simmons, B.A., Henry, R.J. (2015). Potential for Genetic Improvement of Sugarcane as a Source of Biomass for Biofuels. *Front Bioeng. Biotechnol.*, 3: 182. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2015.00182>
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). (2017). Centro de Investigación en Ciencias Políticas, Económicas y Sociales. Informe de productos agropecuarios regionales. Diciembre 2017.

- Kumar, R., Singh, S., Singh, O.V. (2008). Bioconversion of lignocellulosic biomass: biochemical and molecular perspectives. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 35: 377-391. <https://doi.org/10.1007/s10295-008-0327-8>
- La Gaceta. (2017). LCP 85-384 comienza a decrecer su superficie cultivada en el área cañera de Tucumán. 19 August 2017. Available at: <https://www.lagaceta.com.ar/nota/741351/actualidad/cana-azucar-comienza-decrecer-superficie-ocupatucuman-variedad-lcp-85384.html> [Accessed: 2020-4-20]
- Loureiro, M.E., Barbosa, M.H.P., Lopes, F.J.F., Silvério, F.O. (2011). Sugarcane breeding and selection for more efficient biomass conversion in cellulosic ethanol. In: Buckeridge, M.S, Goldman, G.H, editors. *Routes to Cellulosic Ethanol*. ISBN 978-0-387-92739-8. Springer New York Dordrecht Heidelberg London, p. 199-240. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92740-4_13
- López de Heredia. (2016). Las técnicas de secuenciación masiva en el estudio de la diversidad biológica. Massive sequencing techniques in the study of biological diversity. 2016. *Munibe, Cienc. nat. Secuenciación masiva y diversidad biológica*, 64. Donostia/San Sebastián. ISSN 0214-7688. <https://doi.org/10.21630/mcn.2016.64.07>
- Mancini, M.C, Cardoso-Silva, C.B, Araujo Costa, E., Gibbin Marconi, T., Franco Garcia, A.A., Pereira De Souza. (2017). New Developments in Sugarcane Genetics and Genomics. In: M.S. Buckeridge, A.P. De Souza (eds.), *Advances of Basic Science for Second Generation Bioethanol from Sugarcane*, 2017 p. 159-174. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49826-3_9
- McCormick, R.F., Truong, S.K., Sreedasyam, A., Jenkins, J., Shu, S., Sims, D., Kennedy, M., Amirebrahimi, M., Weers, B.D., McKinley, B., Mattison, A., Morishige, D.T., Grimwood, J., Schmutz, J., Mullet, J.E. (2018). "The Sorghum Bicolor Reference Genome: Improved Assembly, Gene Annotations, a Transcriptome Atlas, and Signatures of Genome Organization." *Plant Journal*, 93(2): 338–354. <https://doi.org/10.1111/tjp.13781>
- Ministerio de Hacienda. Secretaría de Política Económica. Informes de cadenas de valor - Azucarera. Junio de 2018 – Año 3 - N° 3. Available at: https://www.economia.gob.ar/peconomica/docs/SSPMicro_Cadenas_de_valor_Azucar.pdf [Accessed: 2020-4-20]
- Noguera, A., Enrique, R., Ostengo, S., Perera, M.F, Racedo, J., Costilla, D., Zossi, S., Cuenya, M.I, Filippone, M.P, Welin, B., Castagnaro, A.P (2019) Development of the transgenic sugarcane event TUC 87-3RG resistant to glyphosate. Reports and Abstracts of the Proceedings of the XXX International Society of Sugar Cane Technologists Congress, 31 August – 8 September 2019, Tucumán, Argentina. Edited by Peter G Allsopp. ISBN: 978-616-92761-0-4. Pages 105-106.
- Ortiz, J.M. (2018) Producción de energía a partir de vinaza en Tucumán: análisis de las diferentes alternativas. Repositorio ITBA. Available at: <https://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/1407> [Accessed: 2019-11-25]
- Ostengo, S., Espinosa, M.A., García, M.B., Delgado, N., Cuenya, M.I. (2012). Distribución varietal del cultivo de la caña de azúcar y aplicación de otras tecnologías en la provincia de Tucumán. Relevamiento campaña 2010/2011. *Gac. Agroindustrial EEAOC* (76).

- Ostengo, S., Díaz, J.V., Espinosa, M.A., Chavanne, E.R.; Costilla, D.D., Cuenya, M.I. (2015). Relevamiento de la distribución de variedades y de otras tecnologías aplicadas en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán: campaña 2013/2014. *Gac. Agroindustrial EEAOC* (78).
- Ostengo, S., Díaz, J.V., Espinosa, M.A., Chavanne, E.R., Aybar Guchea M., Costilla, D.D., Cuenya, M.I. (2018). Distribución de variedades comerciales de caña de azúcar en la provincia de Tucumán. Relevamiento de la campaña 2016/2017. *Avance Agroindustrial*, 39(4): 22-27.
- Paterson, A.H., Bowers, J.E., Bruggmann, R., Dubchak, I., Grimwood, J., Bowers, J.E., Gundlach, H., Haberer, G., Hellsten, U., Mitros, T., Poliakov, A., Schmutz, J., Spannagl, M., Tang, H., Wang, X., Wicker, T., Bharti, A.K., Chapman, J., Feltus, F.A., Gowik, U., Grigoriev, I.V., Lyons, E., Maher, C.A., Martis, M., Narechania, A., Otiillar, R.P., Penning, B.W., Salamov, A.A., Wang, Y., Zhang, L., Carpita, N.C., Freeling, M., Gingle, A.R., Hash, C.T., Keller, B., Klein, P., Kresovich, S., McCann, M.C., Ming, R., Peterson, D.G., Rahman, M.-U., Ware, D., Westhoff, P., Mayer, K.F.X., Messing, J., Rokhsar, D.S. (2009). The Sorghum bicolor genome and the diversification of grasses. *Nature*, 457: 551-556. <https://doi.org/10.1038/nature07723>
- Perera, M.F., Arias, M.E., Costilla, D., Luque, A.C., García, M.B., Díaz Romero, C., Racedo, J., Ostengo, S., Filippone, M.P., Cuenya, M.I., Castagnaro, A.P. (2012). Genetic diversity assessment and genotype identification in sugarcane based on DNA markers and morphological traits. *Euphytica*, 185: 491-510. <https://doi.org/10.1007/s10681-012-0661-9>
- Perera, M.F., Ovejero, S.N., Racedo, J., Noguera, A.S., Cuenya, M.I., Castagnaro, A.P. (2019). TRAP markers allow the identification of transgenic lines that are genetically close to their parental genotype. *Reports and Abstracts of the Proceedings of the XXX International Society of Sugar Cane Technologists Congress*, 31 August – 8 September 2019, Tucumán, Argentina. Edited by Peter G Allsopp. ISBN: 978-616-92761-0-4. Page 107.
- Peterson, B.K., Weber, J.N., Kay, E.H., Fisher, H.S., Hoekstra, H.E. (2012). Double Digest RADseq: An Inexpensive Method for De Novo SNP Discovery and Genotyping in Model and Non-Model Species. *PLoS ONE*, 7(5): e37135. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0037135>
- Piperidis, G., D'Hont, A., Hogarth, D. Chromosome composition analysis of various Saccharum interspecific hybrids by genomic in situ hybridisation (GISH). In: Hogarth DM, editor. *International Society of Sugar Cane Technologists. Proceedings of the XXIV Congress*, Vol. 2 ed. Brisbane: Australian Society of Sugar Cane Technologists; 2001, p. 565–566.
- Racedo, J., Budeguer, F., Perera, M.F., Soria Femenías M.J., Ovejero, S.N., Cuenya, M.I., Castagnaro, A.P., Noguera, A.S. (2019). Development of a further transgenic sugarcane cultivar resistant to glyphosate herbicide. *Reports and Abstracts of the Proceedings of the XXX International Society of Sugar Cane Technologists Congress*, 31 August – 8 September 2019, Tucumán, Argentina. Edited by Peter G Allsopp. ISBN: 978-616-92761-0-4. Page 107-108

- Racedo, J., Gutierrez, L., Perera, M.F., Ostengo, S., Pardo, E.M., Cuenya, M.I., Welin, B., Castagnaro, A.P. (2016). Genome-wide association mapping of quantitative traits in a breeding population of sugarcane, *BMC Plant Biol.*, 16: 142. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0829-x>
- Romero, M., Robredo, C., Uchino, D., Easdale, C., Acosta, M., Yañez Cornejo F, Palacio, C., Serino, G. (2019) Agronomic and compositional characterization of a glyphosate-tolerant transgenic event derived from sugarcane cultivar NA05-2019. Reports and Abstracts of the Proceedings of the XXX International Society of Sugar Cane Technologists Congress, 31 August - 8 September 2019, Tucumán, Argentina. Edited by Peter G Allsopp. ISBN: 978-616-92761-0-4. Page 108.
- Santchurn, D. (2010). *Evaluation and selection of different types of sugarcane varieties for multi-purpose use from a population of inter-specific derived clones*. In: Mauritius Magister Scientiae Thesis, Department of Plant Sciences, Faculty of Natural and Agricultural Sciences. University of the Free State Bloemfontein, South Africa, March 2010, pp 140.
- Secretaría de Gobierno de Energía. (2019). Producción y Ventas de Bioetanol. Available at: <http://datos.minem.gob.ar/dataset/estadisticas-de-biodiesel-y-bioetanol> [Accessed: 2020-4-20]
- Screenivasan, T.V., Ahloowalia, B.S., Heinz, D.J. (1987). Sugarcane improvement through breeding. *Cytogenetics*, 5: 211-253. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42769-4.50010-2>
- Souza, G.M., Berges, H., Bocs, S., Casu, R., D'Hont, A., Ferreira, J.E., Henry, R., Ming, R., Potier, B., Van Sluys M.A., Vincentz, M., Paterson, A.H. (2011). The sugarcane genome challenge: strategies for sequencing a highly complex genome. *Trop. Plant Biol.*, 4: 145-156. <https://doi.org/10.1007/s12042-011-9079-0>
- Tesouro, M.O., Fernández de Ullivarri, E., Venturelli, L., Roba, M., Romito, A., Peralta, A., Donato, L., Bongiovanni, R., Erazzú, L.E., Fontana, P.D. (2019). Yields and economic results of sugarcane cultivation under an alternative system compared to traditional management. *Reports and Abstracts of the Proceedings of the XXX International Society of Sugar Cane Technologists Congress*, 31 August – 8 September 2019, Tucumán, Argentina. Edited by Peter, G. Allsopp. ISBN: 978-616-92761-0-4. Page 23.
- Thirugnanasambandam, P.P, Hoang, N.V., Henry, R.J. (2018). The Challenge of Analyzing the Sugarcane Genome. *Front. Plant Sci.*, 9: 616. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00616>
- Ullivarri, E.F., Vallejo, J.I., Valeiro, A.H. (2011). Briquetas de carbón elaboradas con residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar. In: INTA editor. *Ciencia y Tecnología de los Cultivos Industriales*, Año I, N° 1, 2011. p. 71-72. ISSN 1853-7677. Available at: <https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-revista-ciencia-y-tecnologa-de-los-cultivos-indu.pdf> [Accessed: 2020-4-20]
- USDA GAIN report. (2019). *Argentina Sugar Annual 2019*. Available at: https://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Sugar%20Annual_Buenos%20Aires_Argentina_4-18-2019.pdf [Accessed: 2020-4-20]
- 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>

- Vermerris, W. (2011). Survey of genomics approaches to improve bioenergy traits in maize, sorghum and sugarcane. *J. Integr. Plant Biol.* 53(2), 105–119. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2010.01020.x>
- Wang, J., Ro, B., Macmil, S., Yu, Q., Murray, J.E., Tang, H., Chen, C., Najjar, F., Wiley, G., Bowers, J., Van Sluys M.A., Rokhsar, D.S., Hudson, M.E, Moose, S.P., Paterson, A.H., Ming, R. (2010). Microcollinearity between autopolyploid sugarcane and diploid sorghum genomes. *BMC Genomics*, 11 :261. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-11-261>
- Yang, X., Song, J., Todd, J., Peng, Z., Paudel, D., Luo, Z., Ma, X., You, Q., Hanson, E., Zhao, Z., Zhao, Y., Zhang, J., Ming, R., Wang, J. (2018). Target enrichment sequencing of 307 germplasm accessions identified ancestry of ancient and modern hybrids and signatures of adaptation and selection in sugarcane (*Saccharum* spp.), a ‘sweet’ crop with ‘bitter’ genomes. *Plant Biotechnol. J.*, 17(2): 488-498. <https://doi.org/10.1111/pbi.12992>
- Yang, X., Todd, J., Arundale, R., Binder, J.B., Luo, Z., Islam, M.S., Sood, S., Wang, J. (2019). Identifying loci controlling fiber composition in polyploid sugarcane (*Saccharum* spp.) through genome-wide association study. *Industrial Crops & Products*, 130: 598–605. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.023>

Contenido energético de biomasa del fuste proveniente de plantaciones de eucalipto de corta rotación en Uruguay

Fernando Resquin¹, Rafael M. Navarro-Cerrillo²,
Leónidas Carrasco-Letelier³ y Cecilia Rachid-Casnati¹

¹Programa Nacional de Investigación en Producción Forestal, INIA Tacuarembó, Ruta 5 Km 386, Tacuarembó, Uruguay.

²E.T.S.I.A.M. Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, 14071 Córdoba, España.

³Programa Nacional de Investigación en Producción y Sustentabilidad Ambiental, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA La Estanzuela, Ruta 50 Km 10, Colonia, Uruguay.

1. Introduction

Las plantaciones de diferentes especies forestales en sistemas de corta rotación y en particular los eucaliptos, tanto a nivel experimental como comercial han demostrado un alto potencial de producción de biomasa y de generación de energía en diversos países (Eloy *et al.*, 2015; Rodrigues *et al.*, 2010; Magnago *et al.*, 2016). Esto ha sido una respuesta al intento de reducir el uso de combustibles fósiles y las emisiones de CO₂ teniendo en cuenta que es una materia prima renovable, con bajas emisiones (de S₂O y N₂O), y con balance casi neutro de CO₂. A esto se le suma el hecho de que se visualiza un fuerte incremento a futuro en el consumo de energía (Berndes *et al.*, 2003). Este tipo de biomasa básicamente ha tenido como destino final la generación de energía eléctrica y térmica (Repic *et al.*, 2008), aunque en los últimos años se están dedicando esfuerzos para la obtención de etanol (Hinchee *et al.*, 2011; López *et al.*, 2010) y otro tipo de combustibles líquidos (Swain *et al.*, 2011) y gaseosos (Hanaoka *et al.*, 2005).

La biomasa forestal ha originado interés debido a que posee una serie de ventajas, como son la flexibilidad del momento de la cosecha, la posibilidad de obtener varias cosechas, y la opción de producir distintos tipos de combustibles. No obstante, existen dudas en cuanto al papel que va a ocupar la biomasa en el mercado energético, debido a la posible interacción que tendría con los suelos dedicados a la producción de alimentos, y a los posibles impactos ambientales sobre la biodiversidad y la conservación de los recursos naturales (Berndes *et al.*, 2003). Sin embargo, varias de las especies forestales utilizadas con estos fines se adaptan bien a suelos marginales para la agricultura (Johnson *et al.*, 2007;

Djomo *et al.*, 2013) y a los reducidos espaciamientos que se utilizan procurando obtener altos rendimientos en plazos relativamente cortos (Hakamada, 2017; Guerra *et al.*, 2014). Esto implica que estos sistemas de producción sean aplicables a un amplio rango de condiciones de suelo y clima, aunque esto determina que las características de la biomasa obtenida estén influenciadas por las condiciones locales de cada caso y por la intensidad del manejo utilizado (Nonhebel, 2002; Pérez *et al.*, 2011; Djomo *et al.*, 2013). Para lograr un importante grado de adopción de los cultivos energéticos como regla general se deberían cumplir con los siguientes requisitos: a) maximizar la producción de biomasa por unidad de superficie b) ser sostenibles al mismo tiempo que de bajos costos energéticos; y, c) maximizar la cantidad de combustible obtenido por unidad de biomasa, o dicho de otro modo tener una alta eficiencia de conversión (Johnson *et al.*, 2007). Algunos autores hacen hincapié en este último aspecto en el sentido de seleccionar biomasas con bajo costo de pre-tratamiento, lo que permite obtener altos rendimientos energéticos, lo cual está estrechamente relacionado a la composición química de la misma (Sannigrahi *et al.*, 2010).

En términos de rendimiento energético, debido a que los chips obtenidos de este tipo de cultivos tienen una baja densidad energética, ha sido frecuente la transformación de este tipo de biomasa en combustibles como pellets, briquetas (Eufrede Junior *et al.*, 2016) e inclusive carbón (Walter *et al.*, 2006; Briseño-Urbe *et al.*, 2015; Rodrigues *et al.*, 2010). De los aspectos más relevantes de la biomasa a tener cuenta para los procesos de combustión se mencionan al poder calórico y a la densidad de la madera. Estos dos factores determinan el rendimiento energético, los cuales, a su vez, están íntimamente ligados a parámetros de la composición química de la madera, tales como la lignina, extractivos, celulosa, hemicelulosas y minerales (Quirino *et al.*, 2005; Dias Júnior *et al.* 2015). El poder calórico es un indicador del contenido de energía el cual es transformado en calor mediante el proceso de combustión (Erol y Ku, 2010). Los procesos termo mecánicos más frecuentemente usados para transformar la biomasa son la combustión directa, la gasificación y la pirolisis; y la elección del mismo depende en buena medida de las propiedades de la materia prima (Rocha *et al.*, 2015). Para algunos combustibles como el carbón son deseables características de la madera tales como bajos contenidos de ceniza y altos niveles de lignina, así como de densidad básica (Trugilho, 2009).

La densidad energética expresada como la cantidad de energía generada por unidad de superficie (GJ ha^{-1}) depende del crecimiento, la densidad de la madera y el poder calórico que a su vez son fuertemente dependientes de variables como la especie, la edad y el espaciamiento, entre otros. Si bien se han utilizado muchas especies de rápido crecimiento con propósitos dendroenergéticos como el sauce y el álamo (Villanueva *et al.*, 2011; Kačik *et al.*, 2012), los eucaliptos se destacan debido a la capacidad de adaptación a diversos tipos de ambientes y a la alta productividad energética (Gonzalez *et al.*, 2011). Esta productividad se basa en los altos niveles de crecimiento sumado a valores de medios a altos de densidad básica y poder calórico. También se mencionan, aunque de menor importancia, otros aspectos tales como el bajo contenido de cenizas, azufre y nitrógeno, la homogeneidad de la composición química y el secado relativamente rápido de la madera (Foelkel, 2015). Las maderas con altas densidades tienen mayor rendimiento en caldera a través de la quema directa, mayor rendimiento en la gasificación y menores costos de transporte. Si bien el poder calórico por unidad de peso es muy similar para las especies forestales, las

maderas más densas tienen mayor poder calórico por unidad de volumen (Pereira *et al.*, 2000). Una de las propiedades de los eucaliptos es que su estructura anatómica y química sufre cambios importantes en los primeros años de crecimiento (Pérez *et al.*, 2011) siendo la variación que ocurre en sentido radial la más importante (Malan, 1995). La madera formada en las primeras etapas se denomina madera juvenil, y se caracteriza por presentar una baja densidad, alto contenido de lignina y fibras de menor tamaño. Con el incremento de la edad estas tendencias comienzan a revertirse en períodos relativamente cortos (Vital y Della Lucia, 1987; Carneiro *et al.*, 2014; Protásio *et al.*, 2014b). Los efectos de la edad sobre algunas propiedades energéticas de la madera son consistentes en cuanto van acompañadas de una disminución del contenido de cenizas y de lignina (Trugilho *et al.*, 1996; Soares *et al.*, 2015) y un aumento de la densidad con el paso del tiempo. El poder calórico depende en gran medida de parámetros como la lignina, los extractivos y las cenizas (Kumar *et al.*, 2011) pero no siempre muestra una tendencia definida en función de la edad (Lemenih y Bekele, 2004; Kumar *et al.*, 2010). Los efectos del espaciamiento son más evidentes sobre la tasa de crecimiento individual y por hectárea a través de la modificación de los procesos de competencia por factores como la luz, el agua y los nutrientes; no así sobre las propiedades de la madera registrándose efectos de muy diversa índole (Senelwa y Simms 1999; Moulin *et al.* 2015) aunque la tendencia indica que con los espaciamientos más amplios se obtiene una biomasa con mejores propiedades energéticas (Zanuncio *et al.*, 2014; Rocha *et al.*, 2016). En los sistemas de corta rotación se observan los efectos combinados de los espaciamientos reducidos y de los turnos cortos de cosecha, lo que determina un tipo de biomasa que no siempre es del todo apta para algunos procesos, como por ejemplo la producción de carbón (Rocha *et al.*, 2016). Esos dos parámetros silviculturales están íntimamente relacionados, de modo que las plantaciones con menores espaciamientos requieren de ciclos más cortos debido a que los efectos de la competencia entre individuos comienzan a manifestarse precozmente determinando un estancamiento del crecimiento en forma anticipada (Acuña *et al.*, 2018). En términos generales se observa que con turnos de cosecha más largos y mayores densidades de plantación se obtienen los mayores rendimientos energéticos por unidad de superficie (Guerra *et al.*, 2014; Eloy *et al.*, 2016).

Por tanto, los resultados obtenidos en cultivos energéticos de corta duración dependen en gran medida de las condiciones de sitio y del sistema de producción utilizado, de forma tal que es necesario identificar las condiciones que optimicen la producción de energía en función factores tales como la especie y densidad de plantación. A partir de esta hipótesis, el objetivo general de este trabajo fue ensayar tres especies de eucalipto a distintas densidades de plantación para determinar que combinación maximiza la obtención de energía por hectárea durante un periodo de 76 meses. La hipótesis planteada es que la edad, la especie y la densidad de plantación afectan la cantidad de energía generada. Para ello, se establecieron los siguientes objetivos específicos: a) conocer los efectos de la especie, la edad, el espaciamiento y el sitio sobre las propiedades energéticas de la madera b) cuantificar el rendimiento energético especie y de la densidad de plantación a lo largo del ciclo del cultivo. c) Identificar el momento óptimo de cosecha en cada caso que maximice el rendimiento energético d) Determinar las relaciones entre las propiedades energéticas de la biomasa.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio, características de los ensayos y mediciones de peso

La descripción de la ubicación y principales características de los ensayos así como las estimaciones de peso realizadas está contenidas en el capítulo: Biomasa de Eucalyptus.

2.2 Poder calórico superior, densidad energética y rendimiento energético

Luego de secado cada disco en estufa con ventilación y circulación forzada a una temperatura de a 60 °C fue molido en molino marca RETSCH modelo SR 200 hasta alcanzar un tamaño de partícula de 40-60 mesh. Con las muestras extraídas de los árboles apeados de cada parcela en cada inventario de los años 2012, 2015 y 2016 se formó una muestra compuesta por árbol ponderada en función de la superficie de cada disco de las distintas alturas muestreadas. La determinación del poder calórico (P_c , $J g^{-1}$) fue realizada de acuerdo al procedimiento PEC.FORES.017 basado en las normas DIN 519001:2000 y 51900-2:2003.

La densidad energética (De , $Mj m^{-3}$) fue estimada (previa conversión de unidades) como el producto de Db por el P_c para los inventarios en los años 2012, 2015 y 2016.

El rendimiento energético por hectárea (Re , $MWh ha^{-1}$) fue estimado (previa conversión de unidades) como el producto de la productividad de biomasa por hectárea media de la parcela por el P_c . Con el Re dividido por cada una de las edades de todos los inventarios fue estimado el incremento medio anual del rendimiento energético por hectárea y por año ($IMARe$, $MWh ha^{-1} año^{-1}$).

2.3 Análisis estadístico

El análisis de los datos se realizó de acuerdo con un modelo de parcelas divididas en bloques completos al azar (Ecuación 1):

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_j + \tau_i + \gamma_k + \tau\gamma_{ik} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

Donde Y_{ijk} es la variable medida en la especie i , densidad 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, efecto fijo; β_j es el efecto j del bloque; $\tau\gamma_{ik}$ es la interacción especie y densidad, 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 . El análisis estadístico comenzó con la comprobación de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante los test de Shapiro-Wilk y Brown-Forsythe, respectivamente. Cuando las variables no tuvieron una distribución normal se utilizaron las transformaciones de tipo Box and Cox, a través de las funciones `boxcoxfit` para obtener el valor de lambda y `bcPower` para calcular la nueva variable. El supuesto de aleatoriedad se comprobó debido a que la asignación de los factores especie y densidad de plantación (una vez asignada la especie) fue realizada por sorteo en ambos sitios. El análisis de los efectos años y sitios fue realizado con el test no paramétrico de Kruskal-Wallis ya que no fue posible comprobar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. El efecto del factor especie se contrastó con el error definido como

la interacción de este con el bloque mientras que los efectos de los factores densidad de plantación y de la interacción se contrastaron con el cuadrado medio del error. El análisis de las variables *Pc*, *Db*, *De*, *Re* e *IMARe* para cada sitio fue realizado mediante la prueba F del análisis de varianza. Las comparaciones entre medias a posteriori de la prueba F y del test no paramétrico se realizaron con el test de Tukey y Dunn, respectivamente. El nivel de significación se estableció en un valor de $p < 0,05$. Los análisis se realizaron con el software R versión 2.14.1 (R Development Core Team, 2012) y Statistix10.

3. Resultados

Los valores del *Pc*, *Db*, *De*, *Re* e *IMARe* para las especies y densidades de plantación del último inventario en Tacuarembó y Paysandú son presentados en las Tablas 1 y 2. En Tacuarembó los contrastes de medias de la *De* muestran que los valores más altos corresponden a las especies *E. benthamii* y *E. dunnii*, los cuales están asociados a los valores más altos de *Db* de las mismas ya que los valores de *Pc* son muy similares en las tres especies evaluadas. El *Re* en este sitio también está asociado a la productividad de biomasa por hectárea, de modo que los niveles más altos se alcanzan con las densidades de plantación más altas. En Paysandú, el contraste de medias indica que los mayores valores de *Pc* se obtuvieron con las densidades de plantación más altas para las tres especies. Los valores de *De* reflejan una mayor paridad entre las diferentes especies y densidades de plantación debido a que los mayores valores de *Db* son registrados por las densidades menores de plantación y, por tanto, reduciendo las diferencias observadas con el *Pc*. Los valores de *Re* e *IMARe* acompañan los niveles de productividad de biomasa que en términos generales son alcanzados con los espaciamientos más reducidos.

Tabla 1. Valores de *Pc*, *Db*, *De*, *Re* e *IMARe* para las especies y densidades de plantación en Tacuarembó a la edad de 75 meses. Valores seguidos con la misma letra minúscula y mayúscula indican diferencias no significativas entre densidades de plantación y especies, respectivamente, mediante el test de Tukey con una probabilidad del 5%. Letras en negrita indican diferencias correspondientes a la interacción especie x densidad de plantación.

Especie	Densidad de plantación (árboles ha ⁻¹)	<i>Pc</i> (J g ⁻¹)	<i>Db</i> (g cm ⁻³)	<i>De</i> (Mj m ⁻³)	Producción de madera (Mg ha ⁻¹)	<i>Re</i> (MWh ha ⁻¹)	<i>IMARe</i> (MWh ha ⁻¹ año ⁻¹)
<i>E. benthamii</i>	2220	19785 A a	0.410 B a	8120 B a	104.1	572 c	91.6 c
	3330	19952 A a	0.413 B a	8241 B a	110.9	614 c	98.2 c
	4440	20119 A a	0.409 B a	8227 B a	172.6	965 abc	154.4 abc
	6660	19862 A a	0.420 B a	8332 B a	212.6	1172 a	187.6 a
<i>E. dunnii</i>	2220	19892 A a	0.420 A a	8355 A a	130.3	720 bc	115.2 bc
	3330	19746 A a	0.442 A a	8728 A a	153.3	841 abc	134.5 abc
	4440	19768 A a	0.429 A a	8474 A a	155.8	855 abc	136.7 abc
	6660	19704 A a	0.434 A a	8551 A a	186.7	1021 ab	163.4 ab

Contenido energético de biomasa del fuste proveniente de plantaciones de eucalipto de corta rotación en Uruguay

Resquin et al.

Especie	Densidad de plantación (árboles ha ⁻¹)	P _c (J g ⁻¹)	Db (g cm ⁻³)	De (Mj m ³)	Producción de madera (Mg ha ⁻¹)	Re (MWh ha ⁻¹)	IMARe (MWh ha ⁻¹ año ⁻¹)
<i>E. grandis</i>	2220	19925 A a	0.376 C a	7486 C a	111.2	616 c	98.5 c
	3330	20019 A a	0.381 C a	7617 C a	124.3	691 bc	110.5 bc
	4440	20034 A a	0.369 C a	7401 C a	184.2	1025 ab	164.1 ab
	6660	20160 A a	0.378 C a	7620 C a	150.2	841 abc	134.5 abc

Tabla 2. Valores de P_c, Db, De, Re e IMARe para las especies y densidades de plantación en Paysandú a la edad de 76 meses. Valores seguidos con letras mayúsculas y minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre densidades de plantación y especies, respectivamente, mediante el test de Tukey con una probabilidad del 5%.

Especie	Densidad de plantación (árboles ha ⁻¹)	P _c (J g ⁻¹)	Db (g cm ⁻³)	De (Mj m ³)	Producción de madera (Mg ha ⁻¹)	Re (MWh ha ⁻¹)	IMARe (MWh ha ⁻¹ año ⁻¹)
<i>E. benthamii</i>	2220	19449 A b	0.520 AB a	10107 b	159.9	863 a	136 a
	3330	19678 A ab	0.509 AB b	10011 b	185.6	1014 a	160 a
	4440	19838 A a	0.467 AB bc	9266 b	124.7	688 b	109 b
	6660	19858 A ab	0.487 AB c	9663 b	175.2	966 a	153 a
<i>E. dunnii</i>	2220	19467 A b	0.610 A a	11876 a	187.7	1014 a	160 a
	3330	19707 A ab	0.522 A b	10281 b	188.6	1032 a	163 a
	4440	19789 A a	0.510 A bc	10089 b	198.7	1092 a	172 a
	6660	19710 A ab	0.513 A c	10104 b	197.5	1082 a	171 a
<i>E. grandis</i>	2220	19445 A b	0.503 B a	9790 b	159.2	859 a	136 b
	3330	20043 A ab	0.480 B b	9624 b	233.0	1296 a	205 a
	4440	20100 A a	0.446 B bc	8968 b	195.2	1090 a	172 a
	6660	19793 A ab	0.402 B c	7950 c	224.1	1232 a	194 a

Los resultados de los análisis de varianza del P_c, Db, De, Re e IMARe para los dos sitios en el último de los inventarios realizados son presentados en la Tabla 3. En Tacuarembó la interacción tiene un efecto significativo para el Re y el IMARe. La Db y De son afectadas significativamente por la especie. No se detectan efectos significativos ni de la especie, ni de la densidad de plantación, ni de la interacción sobre el P_c. En el sitio de Paysandú se detecta que el efecto de la interacción especie*densidad es significativo para la De, Re e IMARe. El

P_c es afectado significativamente sólo por la densidad de plantación y la Db es afectada por la especie y la densidad de plantación.

Tabla 3. Resultados del análisis de varianza del P_c , De y Re de la especies y densidades de plantación en Tacuarembó y Paysandú a la edad de 75 y 76 meses, respectivamente.

Paysandú										
Efectos	P_c ($J g^{-1}$)		Db ($g cm^{3-1}$)		De ($Mj m^{3-1}$)		Re ($MWh ha^{-1}$)		IMARe ($MWh ha^{-1}$)	
	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>
Especie	0.41	0.689	14.8	0.014	22.13	0.0069	7.38	0.0455	7.38	0.0455
Densidad de plantación	4.2	0.02	15.2	<0.0001	12.2	0.0001	8.82	0.0008	8.81	0.0008
Especie * Densidad	0.48	0.816	2.3	0.083	2.72	0.0467	4.4	0.0066	4.40	0.0066
Tacuarembó										
Efectos	P_c ($J g^{-1}$)		Db ($g cm^{3-1}$)		De ($Mj m^{3-1}$)		Re ($MWh ha^{-1}$)		IMARe ($MWh ha^{-1}$)	
	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	<i>F</i>	<i>p-valor</i>
Especie	6.63	0.053	106.8	0.0003	66.4	<0.0001	3.35	0.1396	3.38	0.138
Densidad de plantación	1.01	0.41	0.73	0.549	0.78	<0.521	16.43	<0.0001	16.45	<0.0001
Especie * Densidad	2.67	0.05	0.22	0.966	0.16	0.984	2.79	0.0425	2.79	0.0424

Los resultados del análisis no paramétrico de los parámetros mencionados en cada uno de los inventarios en cada sitio son presentados en la Tabla 4. En Tacuarembó, el factor edad afecta el P_c y también el Re , el cual depende del crecimiento como fuera mencionado anteriormente. En el sitio de Paysandú se detectan diferencias significativas entre inventarios para todas las variables analizadas mostrando que la edad tiene un efecto evidente sobre las propiedades energéticas de la madera.

En Paysandú, el contraste de medias muestra que existen diferencias significativas entre las diferentes edades de evaluación para todas las variables analizadas (Tabla 5).

Tabla 4. Resultados del test no paramétrico del efecto de la edad en cada uno de los sitios.

Sitios	<i>Pc</i> (J g ⁻¹)		<i>Db</i> (g cm ⁻³)		<i>De</i> (Mj m ⁻³)		<i>Re</i> (MWh ha ⁻¹)		<i>IMARe</i> (MWh ha ⁻¹ año ⁻¹)	
	<i>H</i>	<i>p-valor</i>	<i>H</i>	<i>p-valor</i>	<i>H</i>	<i>p-valor</i>	<i>H</i>	<i>p-valor</i>	<i>H</i>	<i>p-valor</i>
Paysandú	25.9	<0.0001	41.5	<0.0001	46.3	<0.0001	116.2	<0.0001	54.6	<0.0001
Tacuarembó	77.1	<0.0001	2.7	0.263	2.03	0.363	109.1	<0.0001	79.6	<0.0001

Tabla 5. Resultados de comparación de medias del efecto de la edad en cada sitio. Valores medios seguidos con letras diferentes indican diferencias significativas entre edades para cada sitio, mediante el test de Dunn con una probabilidad del 5%.

Sitios	Meses	<i>Pc</i> (J g ⁻¹)	<i>Db</i> (g cm ⁻³)	<i>De</i> (Mj m ⁻³)	<i>Re</i> (MWh ha ⁻¹)	<i>IMARe</i> (MWh ha ⁻¹ año ⁻¹)
Paysandú	18	19665 a	0.430 b	8451 b	154.4 c	102.9 b
	49	19518 b			572.8 b	140.3 a
	57	19748 a	0.429 b	8462 b	690.4 b	145.4 a
	76	19740 a	0.497 a	9810 a	1019.0 a	160.9 a
Tacuarembó	22	19745 b	0.416 a	8208 a	96.9 c	52.8 b
	46	19437 c			481.1 b	125.5 a
	57	19859 ab	0.400 a	7954 a	612.2 b	128.9 a
	75	19914 a	0.406 a	8096 a	827.7 a	132.4 a

El *Pc*, la *Db* y, por lo tanto, las *De* experimentan un aumento significativo con el incremento de la edad, en particular en la última evaluación (76 meses). El *Re* sigue una tendencia análoga a los cambios de la producción de biomasa, mostrando un aumento acumulado con la edad hasta los 76 meses, mientras que el rendimiento por hectárea y por año muestra incrementos relativamente estables a partir del mes 49.

En Tacuarembó la *Db* y la *De* se mantienen sin cambios frente al aumento de la edad, al mismo tiempo que aumenta el *Pc* y el *Re*; este último por las razones ya mencionadas. Con el rendimiento de energía por hectárea y por año ocurre un comportamiento similar al de Paysandú a partir del mes 46 (Tabla 5). Los resultados del test no paramétrico para el efecto del sitio en cada uno de los inventarios son presentados en la Tabla 6. Del mismo se obtiene que en general en todos los inventarios hay diferencias entre sitios en los parámetros energéticos de la madera. Los contrastes de medias de los parámetros mencionados entre sitios para cada uno de los inventarios son presentados en la Tabla 7. En cada uno de los inventarios se obtienen valores más altos de la *Db* y de la *De* en el sitio de Paysandú, mientras que ocurre un comportamiento inverso del *Pc*. El *Re* e *IMARe* es mayor en el sitio de Paysandú en todos los inventarios debido a la mayor productividad alcanzada en este sitio. Los coeficientes de correlación lineal simple entre la *Db* y el *Pc* considerando todas las

edades en conjunto son negativos en los sitios (Tabla 8). Los coeficientes de correlación parcial de la *Db* y el *Pc* con la *De* son muy similares para ambas variables.

Tabla 6. Resultados del test no paramétrico el efecto del sitio sobre los parámetros energéticos en cada uno de los inventarios.

Meses	<i>Pc</i> (J g ⁻¹)		<i>Db</i> (g cm ⁻³)		<i>De</i> (Mj m ⁻³)		<i>Re</i> (MWh ha ⁻¹)		<i>IMARe</i> (MWh ha ⁻¹ año ⁻¹)	
	<i>H</i>	<i>p-valor</i>	<i>H</i>	<i>p-valor</i>	<i>H</i>	<i>p-valor</i>	<i>H</i>	<i>p-valor</i>	<i>H</i>	<i>p-valor</i>
18-22	9.4	0.0022	4.70	<0.030	4.2	0.042	35.9	<0.0001	49.8	<0.0001
46-49	1.4	0.246					11.5	0.0007	5.5	0.0186
57	4.5	0.033	8.7	0.0032	7.4	0.0066	7.5	0.0062	7.5	0.0062
75-76	5.2	0.022	39.9	<0.0001	39.1	<0.0001	15.6	0.0001	14.5	0.0001

Tabla 7. Resultados de comparación de medias de cada sitio en cada uno de los diferentes inventarios. Valores medios seguidos con letras diferentes indican diferencias significativas entre sitios para cada uno de los inventarios mediante el test de Dunn con una probabilidad del 5%.

Meses	Sitios	<i>Pc</i> (J g ⁻¹)	<i>Db</i> (g cm ⁻³)	<i>De</i> (Mj m ⁻³)	<i>Re</i> (MWh ha ⁻¹)	<i>IMARe</i> (MWh ha ⁻¹ año ⁻¹)
18-22	Paysandú	19665 b	0.430 a	8451 a	154.4 a	102.9 a
	Tacuarembó	19745 a	0.416 b	8208 b	96.9 b	52.8 b
46-49	Paysandú	19518 a			572.8 a	140.3 a
	Tacuarembó	19437 a			481.1 b	125.5 b
57	Paysandú	19748 b	0.429 a	8462 a	690.4 a	145.4 a
	Tacuarembó	19859 a	0.400 b	7954 b	612.2 b	128.9 b
75-76	Paysandú	19740 b	0.497 a	9810 a	1019.0 a	160.9 a
	Tacuarembó	19914 a	0.406 b	8096 b	827.7 b	132.4 b

Tabla 8. Coeficientes de correlación simple y parcial de las variables *Db*, *Pc* y *De* en cada sitio para el conjunto de las edades evaluadas.

Sitios	Correlación parcial <i>DePc.Db</i>		Correlación parcial <i>DeDb.Pc</i>		Correlación simple <i>Pc.Db</i>	
	<i>r</i>	<i>p-valor</i>	<i>r</i>	<i>p-valor</i>	<i>r</i>	<i>p-valor</i>
Paysandú	0.988	<0.0001	0.999	<0.0001	-0.355	0.0002
Tacuarembó	0.996	<0.0001	0.999	<0.0001	-0.323	0.0006

La evolución de los valores de P_c en Tacuarembó muestra una tendencia con valores medios ligeramente superiores a los del sitio de Paysandú y con un significativo incremento con el incremento de la edad. En Paysandú muestra que en todos los casos hay una cierta variación de los valores que no responden a un patrón definido, en particular para las diferentes densidades de plantación (Figura 1). Por otro lado, en las tres especies se registra un aumento de la dispersión en los distintos espaciamientos con el incremento de la edad, al mismo tiempo que un aumento significativo de los valores medios. En ambos casos ocurrió una leve disminución de los valores en el segundo inventario.

La estabilidad de los valores de la Db registrados en Tacuarembó determina que la De se mantenga sin cambios frente a los cambios en la edad y en las diferentes densidades de plantación. La De registrada en Paysandú sigue la tendencia observada con el aumento del P_c y la Db a los 76 meses (Figura 2). Hasta el mes 57, los valores medios de especies y densidades de plantación se mantienen relativamente estables. En las tres especies se observa que en el último inventario los mayores valores se obtienen con las menores densidades de plantación, explicado básicamente por los mayores valores de Db que se obtienen con los mayores espaciamientos.

El valor del Re se incrementa con la edad en ambos sitios debido, básicamente, al aumento de la productividad acumulada alcanzada con el paso del tiempo (Figura 3). En Tacuarembó se observa una relación más estrecha con las tres especies entre el contenido de energía por hectárea y la densidad de plantación, de modo que en casi todos los casos los mayores rendimientos energéticos se obtienen con las densidades de plantación más altas. En Paysandú, *E. dunnii* y *E. grandis* muestran una clara asociación entre la densidad de plantación y la cantidad de energía por hectárea contenida en la madera, lo cual responde a la mayor productividad que se registran con los menores espaciamientos. En el caso de *E. benthamii* no se observa una relación definida entre la productividad y la densidad de plantación lo cual se ve reflejado en el contenido de energía de los distintos espaciamientos.

La evolución del Re e $IMARe$ en Tacuarembó muestra un comportamiento diferente para cada una de las especies (Figura 4). *E. benthamii* registra con todas las densidades de plantación un incremento en el contenido de energía por hectárea hasta el mes 57, momento a partir del cual ocurre una leve disminución hasta el mes 75. En el caso de *E. dunnii* ocurrió un evidente cambio de inflexión en las curvas del contenido de energía en el mes 46, pero con aumentos levemente crecientes en todas las densidades hasta el final del período de evaluación. *E. grandis* también ocurrió un cambio de inflexión en el mes 46 con todas las densidades de plantación, excepto con 6660 árboles por hectárea. A partir de este momento las densidades de 3330 y 2220 árboles por hectárea se mantuvieron sin mayores cambios o con una ligera reducción, respectivamente. En Paysandú en términos generales muestra incrementos crecientes con el aumento de la edad. Excepto con *E. grandis*, los mayores incrementos se asocian a los menores espaciamientos.

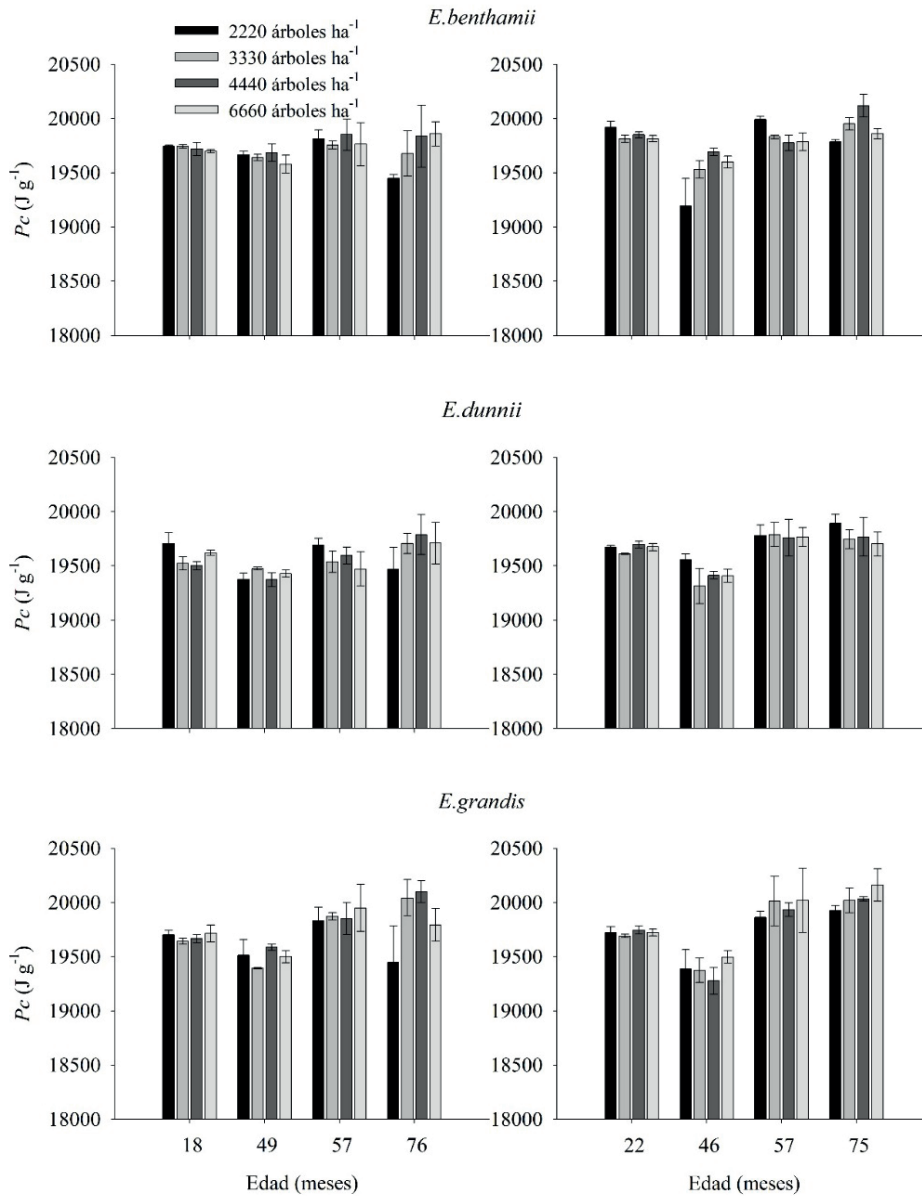


Figura 1. Evolución del P_c para cada especie y densidad de plantación en el sitio de Paysandú (izquierda) y Tacuarembó (derecha).

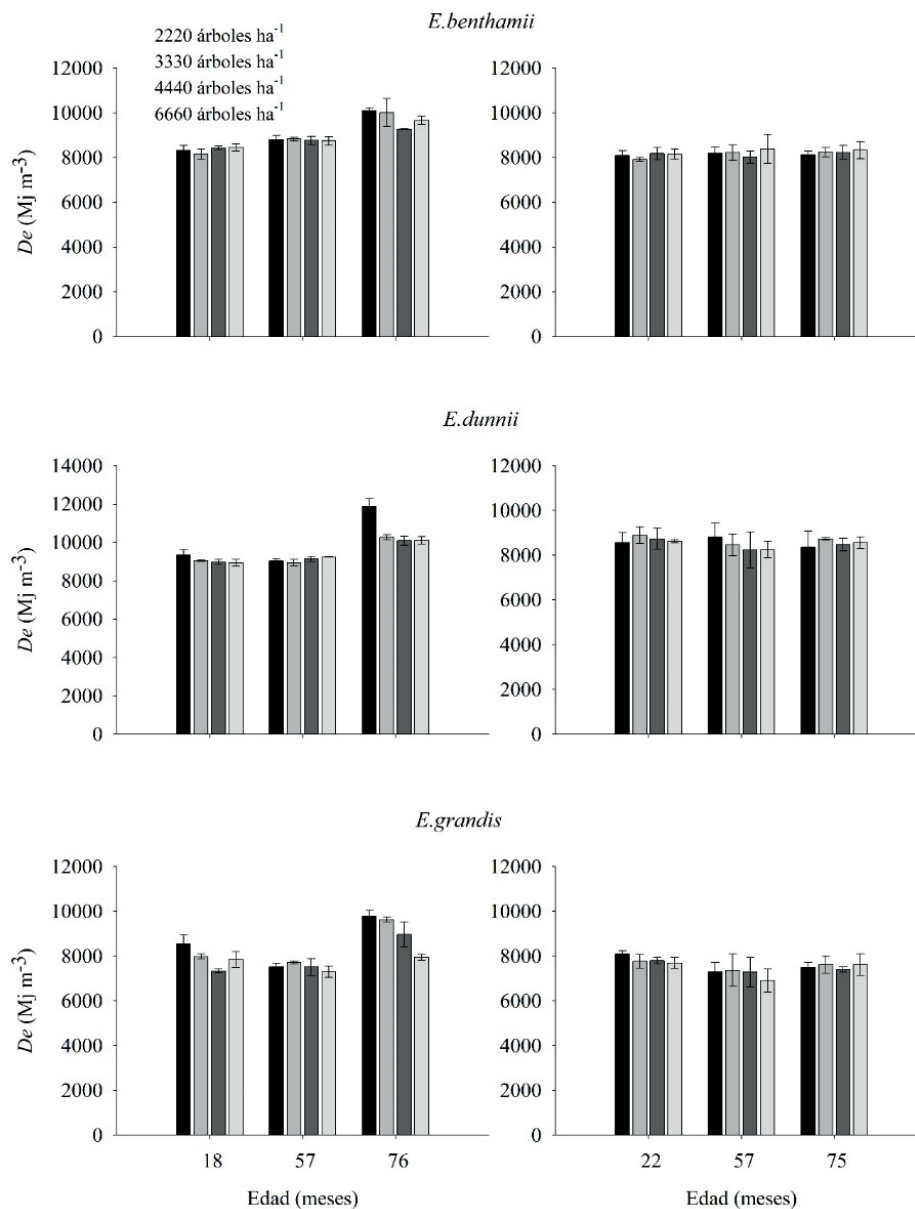


Figura 2. Evolución de la D_e para cada especie y densidad de plantación en el sitio de Paysandú (izquierda) y Tacuarembó (derecha).

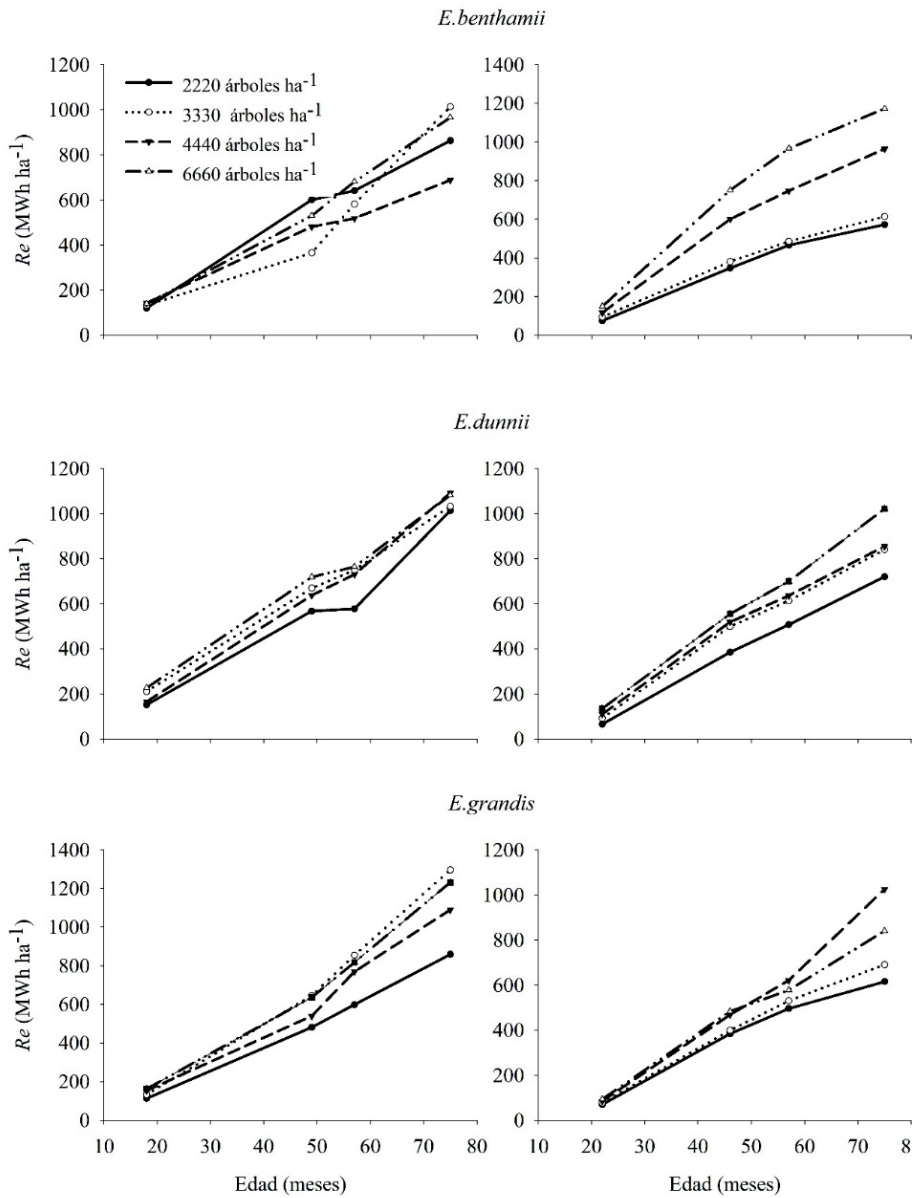


Figura 3. Evolución del Re de cada especie y densidad de plantación en el sitio de Paysandú (izquierda) y Tacuarembó (derecha).

Contenido energético de biomasa del fuste proveniente de plantaciones de eucalipto de corta rotación en Uruguay
Resquin et al.

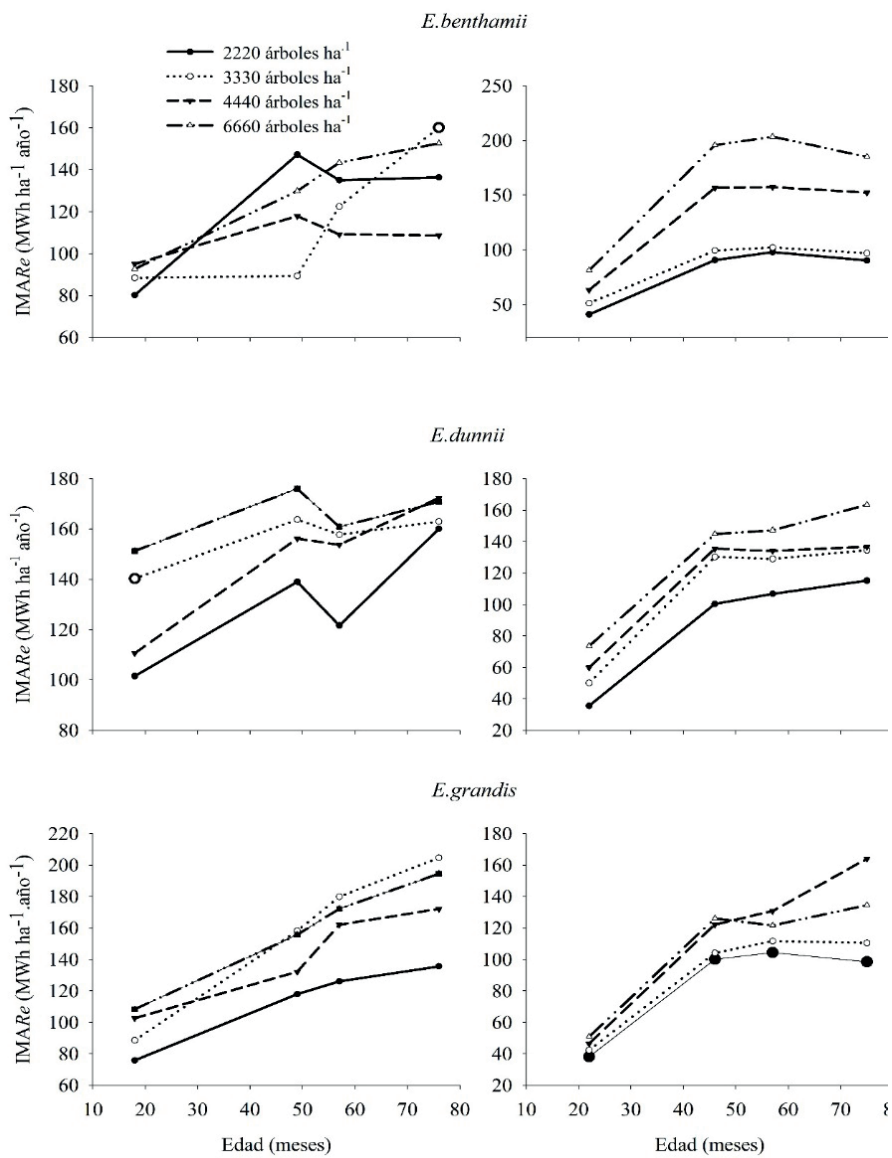


Figura 4. Evolución del Re por ha y por año para cada especie y densidad de plantación en el sitio de Paysandú (izquierda) y Tacuarembó (derecha).

4. Discusión

Los resultados obtenidos en este trabajo confirman la hipótesis planteada de que la especie, la densidad de plantación, el sitio y la edad afectan los parámetros energéticos de la madera. Los cambios producidos por estos factores son de orígenes muy diversos y tienen distintos tipos de efectos sobre los contenidos de energía. Las especies evaluadas tienen características anatómicas y de crecimiento que determinan diferencias tanto en la *De* como en el *Re*. La primera de las variables está asociada a diferencias en las dimensiones de las fibras las cuales se vinculan directamente con la cantidad de madera por unidad de volumen (Mimms *et al.*, 1993) y el *Re* está estrechamente ligado a los niveles de crecimiento propios de cada una como ya ha sido verificado previamente (Capítulo Biomasa de Eucalyptus). La densidad de plantación es sin duda el factor que mayor incidencia tiene sobre los niveles de energía obtenidos ya que está directamente relacionado con la productividad de biomasa por unidad de superficie la cual a su vez depende de la edad del cultivo. Estos parámetros en forma conjunta determinan el momento óptimo de cosecha debido a que condicionan los efectos de competencia entre árboles. El sitio, si bien se asume de acuerdo a estudios previos (Balmelli y Resquin, 2004), que tiene influencia sobre el crecimiento de las especies de eucaliptos en este caso estuvo asociado a diferencias en las condiciones previas e inmediatamente posteriores a la instalación del ensayo (Capítulo Biomasa de Eucalyptus). Finalmente, la edad interviene en cambios que ocurren en las propiedades físicas y químicas de la madera las cuales provocan alteraciones tanto de en la *Db* como en el *Pc* de la madera.

4.1 Poder calórico

En Tacuarembó el *Pc* es el mismo para todas las especies y densidades de plantación, pero se observa un comportamiento similar al sitio anterior en el sentido de que ocurre un incremento con la edad, en particular a partir del mes 57. Rocha *et al.*, (2016), evaluando los efectos de distanciamientos de 1.5 a 9 m² en clones de eucaliptos, tampoco detectaron efectos del distanciamiento sobre el *Pc*, aunque sí una relación positiva con el contenido de lignina.

En Paysandú la densidad de plantación es el único de los factores que a la edad de 76 meses tiene un efecto significativo sobre el *Pc*. Los valores obtenidos muestran que los menores espaciamientos son los que tienen los mayores valores de esta variable. De acuerdo a la literatura se podría explicar por un mayor contenido de lignina, lo cual a su vez estaría relacionado con una mayor proporción de madera juvenil en árboles de diámetro reducido (Calonego *et al.*, 2005; Oliveira, 1997). Los valores medios del *Pc* de las diferentes especies de eucaliptos son muy similares entre sí, lo cual concuerda con lo obtenido por varios autores (Senelwa y Simms, 1999; Pérez *et al.*, 2008; Pérez *et al.*, 2014) que determinan que esta variable presenta un rango de variación relativamente reducido entre los diferentes tipos de maderas. De acuerdo a Guerra *et al.*, (2014), Wionzek, (2014) y Eloy *et al.*, (2016), el *Pc* es una variable poco afectada por los tratamientos silviculturales y depende en gran

medido de aspectos de la composición química como la lignina, los extractivos y las cenizas (Demirbas, 2004; Santana, 2009; Santos *et al.*, 2016). También se cita a la relación siringila/guaiacila como un parámetro asociado positivamente con el incremento de la edad y con el *Pc* de la madera de los eucaliptos (Santos, 2010; Castro *et al.*, 2015). Resultados obtenidos por Carvalho *et al.*, (1998) con un híbrido de eucalipto muestran un incremento en el contenido de lignina y de extractivos con el aumento de la edad en plantaciones de eucalipto entre los 4 y los 9 años, aunque también se han obtenido resultados con tendencias diferentes (Trugilho *et al.*, 1996). En este sitio se observa un incremento de apenas el 2% (400 J g^{-1}) del *Pc* para las densidades de 6660 y 4440 árboles por hectárea comparado con la densidad de 2220 árboles por hectárea. A los efectos prácticos, se considera una diferencia relevante por encima de los 1250 J g^{-1} (Brand, 2010). Si bien existen ciertas oscilaciones de este parámetro en las diferentes edades se observa cierto incremento significativo con el paso del tiempo. Resultados diferentes fueron reportados por Lemenih y Bekele, (2004) obteniendo una relación negativa entre la edad y el *Pc* de diferentes especies de eucaliptos. Trabajos relacionados al tema muestran que la reducción que ocurre en el contenido de cenizas con el aumento de la edad sería el factor que estaría explicando este comportamiento (Trugilho *et al.*, 1996; Kumar *et al.*, 2010; Soares *et al.*, 2015).

En los diferentes inventarios se obtiene que, en promedio, en el sitio de Paysandú el *Pc* es mayor que en el sitio de Tacuarembó. De entre las posibles causas que podrían explicar estas diferencias se menciona un efecto indirecto que podría provocar la *Db*, la cual se asocia con menores contenidos de cenizas (Soares *et al.*, 2014). Por tanto, los mayores valores de *Db* registrados en Paysandú estarían asociados a un menor contenido de cenizas la cual es un material inerte que contribuye a un menor contenido de energía por unidad de peso (Hansted *et al.*, 2018).

4.2 Densidad básica

En cuanto a la *Db*, en Tacuarembó, no se observa una relación entre los valores de la densidad de la madera y las especies, las densidades de plantación o las edades evaluadas.

En Paysandú, *E. benthamii* y *E. dunnii* son las especies con los valores más altos de densidad de la madera. Esto de alguna manera se explica por el hecho de que los materiales genéticos de estas dos especies son utilizados comercialmente por sus aptitudes para la producción de celulosa. Esto confirma los resultados obtenidos en ensayos realizados previamente con este tipo de especies (Backman y García de Leon, 2003).

Los resultados registrados muestran una relación inversa entre la densidad de la madera y la densidad de plantación. Los efectos del espaciamiento sobre la densidad de la madera han sido evaluados por varios autores y, en general, se asocian a cambios en la anatomía de la madera en función de diferentes velocidades de crecimiento. Las causas que explican este tipo de comportamientos se asocian a una mayor uniformidad de la densidad y una mayor proporción de madera adulta en los pies de mayores diámetros (Cassidy *et al.*, 2013; Malan y Hoon, 1992), al mismo tiempo que una mayor proporción de madera juvenil en árboles creciendo en condiciones de alta competencia (Larson *et al.*, 2001).

Las diferencias entre los valores medios de ambos sitios, que se observa en cada uno de los inventarios, ha sido determinada en estudios anteriores (Resquin *et al.*, 2005) pero no han sido identificadas las posibles causas que expliquen esos resultados

4.3 Densidad Energética

En Tacuarembó la *De* sigue la misma tendencia que la *Db*, de modo que los valores más altos son alcanzados por *E. dunnii* y *E. bemthamii*, independientemente de la densidad de plantación. Los valores se mantienen sin cambios en las diferentes edades, lo cual se explica por la estabilidad de la *Db* a pesar del incremento registrado en el *Pc* en los primeros años de crecimiento. Por estos motivos, en Paysandú se obtienen mayores valores de *De* en los diferentes inventarios.

Los valores de *De* en Paysandú están explicados por el aumento registrado en los valores de *Db* y el *Pc*. Esto indica que el incremento de la edad de los árboles determina un mayor contenido de energía por unidad de peso, y en particular de volumen. Resultados semejantes fueron reportados por varios autores (Santana, 2009; Soares *et al.*, 2014; Soares *et al.*, 2015; Eloy *et al.*, 2016), evaluando especies de eucaliptos en sistemas de corta rotación. Según estos autores, los aumentos del contenido energético están asociados principalmente a los cambios que ocurren en la densidad de la madera, ya que el *Pc* está poco afectado por el crecimiento de los primeros años. Teniendo en cuenta que los equipos de combustión de biomasa forestal tienen una capacidad determinada, en la medida que se utilice una materia prima con mayor contenido de energía por unidad de volumen menor será el requerimiento de combustible y, por tanto, mayor la eficiencia del proceso. Tanto la *Db* como el *Pc* también tienen influencia en aspectos económicos tales como el transporte, el manejo y el almacenamiento (Rocha *et al.*, 2015). Con valores de *Db* más altos es posible obtener un mejor desempeño energético en la quema directa o en procesos de transformación, ya que se puede convertir en energía una mayor masa por unidad de volumen (Santos *et al.* 2013). La evolución en los distintos inventarios muestra un aumento significativo de la *De* a partir del mes 57 asociado a los cambios ocurridos en la *Db*.

En ambos sitios se obtiene una correlación simple negativa, aunque de baja magnitud, entre la *Db* y el *Pc* considerando todas las edades evaluadas ($r=-0.355$, $r=-0.323$, para Paysandú y Tacuarembó, respectivamente). Resultados similares fueron obtenidos por (Senelwa y Sims, 1999; Protásio *et al.*, 2014a) que señalan la escasa o nula relación entre ambas variables. Los resultados reportados en la literatura muestran que la relación entre ambas variables con especies de eucaliptos es de muy diversa índole, con valores positivos (de Jesus *et al.*, 2017), negativos como en el presente estudio (Soares *et al.*, 2014; Wu *et al.*, 2017) o neutra (de Lima *et al.*, 2011; Dias Júnior *et al.*, 2016; Brun *et al.*, 2018). Estas diferencias podrían ser atribuibles a los múltiples factores que explican el contenido calórico de la madera. El análisis de las correlaciones parciales entre la *De* con el *Pc* y la *Db* muestra que en los dos sitios esta última es la que tiene un mayor peso relativo sobre el contenido de energía por unidad de volumen. La mayor relación de la *Db* con la *De* comparada con el *Pc* (detectados con los valores de las correlaciones parciales) está vinculada con el reducido efecto que tienen los parámetros silviculturales (tales como la edad, espaciamiento, etc.) sobre este último (Tabla 8).

4.4 Rendimiento energético

El análisis del *Re* en el último inventario muestra que en los dos sitios el resultado obtenido depende de la interacción de la especie y la densidad de plantación. En Tacuarembó los niveles de productividad de energía se corresponden directamente con la productividad

de biomasa ya que el P_c es prácticamente el mismo para todas las especies y todas las densidades de plantación. Por tanto, los niveles más altos de Re se obtienen con las densidades más altas de plantación. Estos niveles de productividad energética están dentro de lo esperado con estas especies y densidades de plantación en condiciones de sitios similares de latitud, suelo y clima (Müller, 2005; Magalhaes, et al., 2017; Ferreira et al., 2017). Considerando los valores medios de cada densidad de plantación se observa que el hecho de duplicar o triplicar el número de árboles por hectárea tiene como respuesta un incremento de 1.5 a 1.6, respectivamente, en la productividad de energía. Desde ese punto de vista, los progresivos aumentos de la cantidad de árboles redundan en una mayor obtención de energía, pero de manera cada vez menos eficiente. Esta tendencia también ha sido observada por varios autores, mostrando que la relación entre la energía obtenida y la densidad de plantación es poco dependiente de las condiciones de crecimiento (Guerra et al., 2014; Eufrede Junior et al., 2016). Los valores acumulados de Re promedio para las especies y densidades de plantación son crecientes hasta el mes 75 de crecimiento. *E. dunnii* y *E. grandis* presentan una tendencia muy similar con el incremento de la edad, con valores crecientes a lo largo del período. En el caso de *E. benthamii* se observa, en cambio, cierta reducción en la tasa de crecimiento de este parámetro en todas las densidades de plantación. Esto podría estar asociado al aumento de la mortalidad ocurrida en las últimas etapas del desarrollo del cultivo. Los valores del rendimiento de energía por hectárea y por año siguen la misma tendencia que la mencionada anteriormente, en el sentido que los valores más altos son alcanzados con los menores espaciamientos de forma similar para todas las especies. En promedio, las especies y las densidades de plantación registran incrementos decrecientes a partir del mes 46 de edad. Los valores de *E. dunnii* y *E. grandis*, en general, muestran una importante reducción en el crecimiento, mientras que en *E. benthamii* se observa un evidente estancamiento a partir de la mencionada edad. Esto sería un indicador de que, para maximizar la producción energética por unidad de tiempo, el turno de cosecha se ubicaría próximo a los cuatro años y que el mismo está condicionado a la evolución de la productividad de biomasa (Balloni y Simões, 1980; Souza, 1989, Lopes et al., 2017).

En Paysandú se obtiene una relación menos definida entre la productividad energética y la densidad de plantación inicial comparada con Tacuarembó. El análisis de los datos muestra una importante similitud entre todas las especies y densidades de plantación, y una estrecha relación con la productividad de biomasa. Al igual que en Paysandú, el Re acumulado promedio para las especies y las densidades de plantación va en aumento hasta la edad de 76 meses. *E. dunnii* y *E. grandis* alcanzan valores medios muy similares entre sí con una relación positiva entre la productividad de energía y el número de árboles, en particular para la segunda de las especies. En el caso de *E. benthamii* se observa cierta independencia entre los referidos parámetros. La evolución del rendimiento por hectárea y por año de *E. dunnii* y *E. grandis* presenta valores crecientes (aunque con oscilaciones) hasta el mes 75, mientras que con *E. benthamii* se observa cierta estabilización de los valores próximo al mes 57. Estos resultados determinan que los turnos de cosecha se alcancen con más edad que en el sitio anterior, lo que se explica por la creciente productividad de biomasa y, en menor medida, por la Db y el P_c . Estas razones son las que determinan las diferencias de productividad entre ambos sitios en todo el rango de edades evaluadas.

Teniendo en cuenta los niveles de productividad energética obtenidos en los dos sitios es posible estimar la superficie a forestar para abastecer una planta de generación de energía eléctrica de pequeño porte como por ejemplo de 10 MW. Con los resultados obtenidos en la primera rotación en los dos sitios las estimaciones de los requerimientos de superficie de plantación se presentan en la Tabla 9. Para esto se asume que esas plantas tienen una eficiencia de conversión del orden del 20-25% (Nuñez-Regueira *et al.*, 2004; Pérez *et al.*, 2014), que la madera se utiliza con un 35% de humedad y que tiene un P_c de 11 $Mj\ kg^{-1}$ [71] (Francescato *et al.*, 2008). Se presentan los valores medios de las especies estudiadas a dos densidades de plantación contrastantes (2220 y 6660 árboles ha^{-1}). Los resultados obtenidos muestran que, a pesar de las importantes diferencias de producción de energía que se obtienen en los sitios, el hecho de utilizar turnos diferentes de cosecha (en función de los valores de IMA de energía) determina que los requerimientos de superficie a forestar sean relativamente semejantes.

Tabla 9. Estimaciones de superficie plantada requerida para abastecimiento de una planta de 10MW.

Sitios	Productividad Biomasa húmeda ($Mg\ ha^{-1}\ año^{-1}$)	Poder calórico ($Mj\ kg^{-1}$)	Productividad energética ($MWh\ ha^{-1}$)	Turno de Cosecha (años)	Requerimientos planta ($MWh\ año^{-1}$)	Superficie a Forestar (ha)
Paysandú	40-47	11	794-935	6	235.000	1775-1510
Tacuarembó	28-44	11	541-862	4	235.000	1740-1090

5. Conclusiones

El P_c es una de las variables menos afectadas tanto por la especie, la densidad de plantación, la edad y el sitio. En Tacuarembó se observa una estrecha relación positiva entre este parámetro y la densidad de plantación, aspecto que no fue detectado en Paysandú. La proporción de energía producida en promedio es cada vez menor a medida que se reduce el espaciamiento. La evolución del rendimiento de energía por hectárea y por año es diferente para cada especie y sitio. No obstante, en general se observa un incremento de esta variable, aunque poco relevante a los efectos prácticos, en los primeros años de crecimiento del cultivo y también con la reducción del espaciamiento en Paysandú. También en este sitio se observa un aumento de la Db conforme la madera va madurando en los primeros años de crecimiento y en los espaciamientos más amplios. En ambos sitios, los valores de Db más altos son registrados con *E. dunnii* y *E. benthamii*. La De en Paysandú es muy similar para todas las condiciones ensayadas, y fue aumentando hasta el final del período de evaluación. Por el contrario, en Tacuarembó los valores fueron afectados solamente por el tipo la especie. El Re acumulado aumentó con la edad, como resultado de la evolución en la productividad de biomasa. En Tacuarembó ocurrió una notoria reducción en la tasa de incremento a partir del mes 46 en todas las especies y densidades de plantación. En

Paysandú, *E. dunnii* y *E. grandis* aumentaron de manera creciente hasta el mes 75, mientras que *E. benthamii* mostró importantes oscilaciones. En Paysandú tuvo mayor *Re* en todos los inventarios debido a la mayor productividad de biomasa. A pesar de esto los requerimientos de superficie para el abastecimiento de una planta de generación de energía eléctrica fueron similares para los dos sitios y asociado a la densidad de plantación. La *Db* y el *Pc* estuvieron negativamente relacionadas y tienen un peso relativo muy similar sobre el resultado de la *De* por unidad de volumen.

6. Referencias

- Acuña, E., R. Rubilar, J. Cancino, T.J. Albaugh, C.A. Maier. (2018). Economic assessment of *Eucalyptus globulus* short rotation energy crops under contrasting silvicultural intensities on marginal agricultural land. *Land Use Policy*. 76, 329–337. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.05.028>
- Backman, M.E., J. García de León. (2003). Correlations of pulp and paper properties at an early age and full, in: Tecnicelpa (Ed.), *EUCEPA Conference: Sustainable Development for the Pulp and Paper Industry*, Lisbon-Portugal, pp. 108–112.
- Balloni, E.A., J.W. Simões. (1980). O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais, *IPEF - Série Técnica*. 1, 1–16.
- 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.
- Berndes, G., M. Hoogwijk, R. Van Den Broek. (2003). The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies, 25, 1–28. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00185-X](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00185-X)
- Brand, M.A. (2010). *Energia de biomassa florestal*. Río de Janeiro. Interciencia. 131 p.
- Briseño-Urbe, K.C., A. Carrillo-Parra, V. Bustamante, H. González-Rodríguez, R. Foroughbakh. (2015). Firewood Production, Yield and Quality of Charcoal From *Eucalyptus camaldulensis* and *E. microtheca* Planted in the Semiarid Land of Northeast Mexico. *International Journal of Green Energy*, 12(9) <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.891121>
- Brun, E., A. Bersh, F. Pereira, D. Silva, Y. de Barba, J. Dorini Junior. (2018). Caracterização energética da madeira de três materiais genéticos de *Eucalyptus* sp., *Floresta*. 48, 87–92. <https://doi.org/10.5380/ufv.v48i1.51673>
- Calonego, F.W., 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, 113–121.
- Carneiro, A. de C.O., A.F.N.M. Castro, R.V.O. Castro, R.C. dos Santos, L.P. Ferreira, R.A.P. Damásio, B.R. Vital. (2014). Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos, *Árvore*, 38, 375–381. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019>
- Carvalho, H., R. Oliveira, J. Gomide, J. Colodette. (1998). Efeito da idade de corte da madeira e de variáveis de refino nas propriedades da celulose kraft branqueada de eucalipto, in: ABTCP (Ed.), *Congresso Anual de Celulose e ABTCP 31*, São Paulo, Brazil, p. 16.

- 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, 919–936. <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9385-5>
- Castro, A.F.N.M., R.V.O. Castro, A.D.C. Oliveira, R.C. dos Santos, A.M.M.L. Carvalho, I. C. N. A. de Melo, P.F. Trugilho. (2015). Correlations between age, wood quality and charcoal quality of eucalyptus clones, *Árvore*, 40, 551–560. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000300019>
- de Jesus, M.S., L.J. Costa, J.C. Ferreira, F.P. De Freitas, L.C. Santos, M. F. V. Rocha. (2017). Caracterização energética de diferentes espécies de eucalyptus, *Floresta*, 47, 11–16. <https://doi.org/10.5380/ufv.v47i1.48418>
- De Lima, E.A., H. Damin, O.J. Lavoranti. (2011). Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 31(65), 9–17. <https://doi.org/10.4336/2011.pfb.31.65.09>
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004>
- Dias Júnior, F.A., A.M. de Andrade, V.W. Soares, D.S. Costa Junior, D.H.A. Alves Ferreira, P.S. dos Santos Leles. (2015). Potencial energético de sete materiais genéticos de Eucalyptus cultivados no Estado do Rio de Janeiro. Energetic potential of seven Eucalyptus genetic materials planted in Rio de Janeiro State. *Scientia Forestalis*, 43, 833–843. <https://doi.org/10.18671/scifor.v43n108.8>
- Djomo, S.N., O. El Kasmioui, T. De Groote, L.S. Broeckx, M.S. Verlinden, G. Berhongaray, R. Fichot, D. Zona, S.Y. Dillen, J.S. King, I.A. Janssens, R. Ceulemans. (2013). Energy and climate benefits of bioelectricity from low-input short rotation woody crops on agricultural land over a two-year rotation, *Applied Energy*, 111, 862–870. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.017>
- Eloy, E., B.O. Caron, A. Behling, E.F. Elli. (2015). Produtividade energética de espécies florestais em plantios de curta rotação, *Ciência Rural*, 45, 1424–1431. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20130177>
- Eloy, E., D.A. Da Silva, D. Schmidt, R. Trevisan, B.O. Caron, E. Elli. (2016). Effect of planting age and spacing on energy properties of *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden1, *Árvore*, 40, 749–758. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000400019>
- Erol, M., S. Ku. (2010). Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data. *Renewable Energy*, 35(1), 170–173. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.008>
- Eufrade Junior, H., R.X. De Melo, M.M. Pereira Sartori, S.P. 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>
- Ferreira, M.C., R. Cavalcante, R. Vinícius, O. Castro, E.D.L. Costa, A.S. Pimenta. (2017). Biomass and energy production at short rotation eucalyptus clonal plantations deployed in Rio Grande do Norte. *Árvore*, 41, 1-7. <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000500004>
- Foelkel, C. (2015). Qualidade da Biomassa Florestal do Eucalipto para Fins Energéticos, *Eucalyptos Newsletter* No 49, 78–107.

- Francescato, V., E. Antonini, L. Bergomi. (2008). *Manual de combustibles de madera*, AVEBIOM, Gráficas Germinal, S.C.L, Valladolid, España, 2008. www.avebiom.org.
- Gonzalez, R., T. Treasure, J. Wright, D. Saloni, R. Phillips, R. Abt, H. Jameel. (2011). Exploring the potential of Eucalyptus for energy production in the Southern United States: Financial analysis of delivered biomass. Part I, *Biomass and Bioenergy*, 35, 755–766. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.10.011>
- Guerra, S.P.S., E.A. Garcia, K.P. Lanças, M.A. Rezende, R. Spinelli. (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., 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, 1–7. <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1256041>
- Hanaoka, T., S. Inoue, S. Uno, T. Ogi, T. Minowa. (2005). Effect of woody biomass components on air-steam gasification, *Biomass and Bioenergy*, 28, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.03.008>
- Hansted, A., T. Aguiar, G. Tami, V. Eliodoro, H. Yamamoto, F. Minoru. (2018). Industrial Crops & Products Use of a lignocellulosic residue as solid fuel: The effect of ash content in the energy potential, *Industrial Crops & Products*, 116, 209–214. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.042>
- 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*. Springer, New York, NY. 39–156. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7145-6_8
- Johnson, J.M., M.D. Coleman, R. Gesch, A. Jaradat, R. Mitchell, D. Reicosky. (2007) Biomass-Bioenergy Crops in the United States: A Changing Paradigm. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology*, 1, 1–28.
- Kačík, F., J. Ďurkovič, D. Kačíková. (2012). Chemical profiles of wood components of poplar clones for their energy utilization. *Energies*, 5, 5243–5256. <https://doi.org/10.3390/en5125243>
- Kumar, R., K.K. Pandey, N. Chandrashekar, S. Mohan. (2010). Effect of tree-age on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus* hybrid, *Journal of Forestry Research*, 21, 514–516. <https://doi.org/10.1007/s11676-010-0108-x>
- Kumar, R., K.K. Pandey, N. Chandrashekar, S. Mohan. (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, 1339–1344. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.031>
- Larson, P.R., D.E. Kretschmann, A.C. Iii, J.G. Isebrands. (2001). *Formation and Properties of Juvenile Wood in Southern Pines A Synopsis*, Rhinelander, Wisconsin.
- Lemenih, M., T. Bekele. (2004). Effect of age on caloric value and some mechanical properties of three Eucalyptus species grown in Ethiopia, *Biomass and Bioenergy*, 27(3), 223–232. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.01.006>

- Lopes, E.D., M.L. de Laia, A.S. dos Santos, G.M. Soares, R.W. Pinto Leite, N.D.S. Martins. (2017). Influência do espaçamento de plantio na produção energética de clones de *Corymbia* e *Eucalyptus*, *Floresta*, 47, 95. <https://doi.org/10.5380/rf.v47i1.47141>
- López, F., J.C. García: A. Pérez, J.M.Feria, M. Zamudio, G. Garrote. (2010). Chemical and Energetic Characterization of Species with a High-Biomass Production: Fractionation of Their Components. *Enviromental Progress & Sustainable Energy*, 29, 499–509. <https://doi.org/10.1002/ep.10429>
- Magalhaes, M., A. Carneiro, B.R. Vital, M.M. De Souza, L.D.F. Fialho. (2017). Estimates of mass and energy of different genetic material *Eucalyptus*, *Árvore*, 41, 1–8. <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000300002>
- Magnago, L.M., M.D.C. Arantes, G.B. Vidaurre, J.C. Moulin, P.F. Trugilho. (2016). Energy Estimate and Carbon Stock in Short-Rotation *Eucalyptus* Stands, *Cerne*, 22, 527–534. <https://doi.org/10.1590/01047760201622042209>
- Malan, F.S. (1995). *Eucalyptus* improvement for lumber production, in: CSIR (Ed.), *Seminário internacional de utilização da madeira de eucalipto para serraria*, Pretoria, South Africa, 1995: pp. 1–19.
- Malan, F.S., M. Hoon. (1992). Effect of initial spacing and thinning on some wood properties of *Eucalyptus grandis*, *South African Forestry Journal*. 163, 13–20. <https://doi.org/10.1080/00382167.1992.9629362>
- Mimms, A., M.J. Kocurek, J.A. Pyiatte, E.E. Wright. (1993). *Kraft Pulping. A Compilation of Notes*. TAPPI, Atlanta, GA, USA. 181 p.
- Moulin, J.C., M.D.C. Arantes, G.B. Vidaurre, J.B. Paes, A.C.O. Carneiro. (2015). Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de *Eucalipto*. *Árvore*, 39(1): 199–208. <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000100019>
- Müller, M.D. (2005). *Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba*, MG. Tese de Doutorado. Universidad Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil. 108 p.
- Nonhebel, S. (2002). Energy yields in intensive and extensive biomass production systems, *Biomass and Bioenergy*, 22, 159–167. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(01\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00071-X)
- Nuñez-Regueira, L., J. Proupín-Castañeras, J. Rodríguez-Añón. (2004). Energy evaluation of forest residues originated from shrub species in Galicia, *Bioresource Technology*, 91, 215–221. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00169-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00169-X)
- Oliveira, J. (1997). *Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica de São Carlos. Universidade de São Paulo. Brasil. 414 p.
- Pérez, S., C.J. Renedo, A. Ortiz, F. Delgado, I. Fernández. (2014). Energy potential of native shrub species in northern Spain, *Renewable Energy*, 62, 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.048>
- Pérez, S., C.J. Renedo, A. Ortiz, M. Man. (2008). Energy potential of waste from 10 forest species in the North of Spain (Cantabria), *Bioresource Technology*, 99(14), 6339–6345. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.12.014>
- 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(11), 4657–4664. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.09.008>

- Pereira, J.C.D., J.A. Sturion, A.R. Higa, R.C.V. Higa, J.Y. Shimizu. (2000). Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. *Embrapa Florestas* 38. 113.
- Protásio, T.D.P., S.L. Goulart, T.A. Neves. (2014a). Clones comerciais de *Eucalyptus* de diferentes idades para o uso bioenergético da madeira Commercial clones of *Eucalyptus* at different ages for bioenergetic use of wood. *Scientia Forestalis*, 42(101), 113–127.
- Protásio, T.D.P., T.A. Neves, A.A. Dos Reis, P.F. Trugilho. (2014b). Effect of age and clone on the quality of *Eucalyptus* spp. wood aiming, *Ciência Florestal*, 24, 465–477. <https://doi.org/10.5902/1980509814587>
- Quirino, W.F., A.T. Do Vale, A.P.A. De Andrade, V.L.S. Abreu, A.C.D.S. Azevedo. (2005). Poder Calorífico Da Madeira E De Materiais Ligno-Celulósicos, *Revista Da Madeira*, 89, 100–106.
- R Core Team. (2012). R: a language and environment for statistical computing. Viena, Austria: R Foundation for Statistical Computing. URL <http://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>
- Repic, B.S., D. V Daki, M.J. Paprika, R. V Mladenovi, A.M. Eri. (2008). Soya straw bales combustion in high-efficient boiler. *Thermal Science*. 12, 51–60. <https://doi.org/10.2298/TSCI0804051R>
- Resquin, F., J.D. 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.
- Rocha, E.P.A., B.F. Gomes, E. Sermyagina, M. Cardoso, J.L. Colodette. (2015). An Analysis of Brazilian Biomass Focusing on Thermochemical Conversion for Energy Production. *Energy and Fuels*, 29(12), 7975–7984. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01945>
- Rocha, P.R.G.H., B.R. Vital, A.C.O. Carneiro, A.M.M.L Carvalho, M.T. Cardoso. (2016). Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of *Eucalyptus* wood and bark. *Journal of Tropical Forest Science*, 28, 243–248.
- Rodrigues, A., J. Bordado, M. Mateus. (2010). An evaluation of SRCS as a potential carbon neutral source of biomass for energy. *International Journal of Energy, Environment and Economics*, 23, 67.
- Sannigrahi, P., A.J. Ragauskas. (2010). Poplar as a feedstock for biofuels: A review of compositional characteristics. *Biofuels Bioproducts & Biorefining*, 4(2), 209–226. <https://doi.org/10.1002/bbb.206>
- Santana, W.M.S. (2009). *Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de Eucalyptus grandis e E. urophylla com enfoque energético*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil. 105 p.
- Santos, D. (2010). *Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brasil. 175 p.

- Santos, D.R.C., A.C.O. Carneiro, A.S. Pimenta, R.V.O. Castro, I.V. Marinho, P.F. Trugilho, I.C.N. Alves, A.F.N.M. Castro. (2013). Potencial energético da madeira de espécies oriundas de plano de manejo florestal no estado do Rio Grande do Norte. *Ciência Florestal* 23(2): 491–502. <https://doi.org/10.5902/198050989293>
- Santos, R., A. Carneiro, B.R. Vital, R. Castro, G. Vidaurre, P. F. Trugilho, A. Castro. (2016). Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal, *Ciência Florestal*, 26, 657–669. <https://doi.org/10.5902/1980509822765>
- Senelwa, K., R.E.H. Sims. (1999). Fuel characteristics of short rotation forest biomass, *Biomass and Bioenergy*, 17, 127–140. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(99\)00035-5](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(99)00035-5)
- Soares, V.C., M.L. Bianchi, P.F. Trugilho, A. Júnior, J. Höfler. (2014). Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto, *Árvore*, 38, 543–549. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300017>
- Soares, V.C., M.L. Bianchi, P.F. Trugilho, J. Höfler, A.J. Pereira. (2015). Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades, *Cerne*, 2, 191–197. <https://doi.org/10.1590/01047760201521021294>
- Souza, R. 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.
- 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, 4917–4933. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.061>
- Trugilho, P.F. (2009). Densidade básica e estimativa de massa seca e de lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*, *Ciênc. Agrotec.*, 33, 1228–1239. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542009000500005>
- Trugilho, P.F., L.J. Tarcício, L.M. Mendes. (1996). Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*, *Cerne*, 2, 94–111.
- Villanueva, M., J. Proupín, J.A. Rodríguez-Añón, L. Fraga-Grueiro, J. Salgado, N. Barros. (2011). Energetic characterization of forest biomass by calorimetry and thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 104, 61–67. <https://doi.org/10.1007/s10973-010-1177-y>
- Vital, B.R., R.M. Della Lucia. (1987). Efeito do espaçamento na produção em peso e na qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* aos 52 meses de idade, *Árvore*, 11, 132–145.
- Walter, A., P. Dolzan, E. Piacente. (2006). *Biomass Energy and Bioenergy Trade: Historic Developments in Brazil and Current Opportunities*. Country Report: Brazil – Task 40 – Sustainable Bio-energy Trade, securing Supply and Demand Final Version. Unicamp, Campinas – Brazil. 36 p.
- Wionzek, F. (2014). *Influência do espaçamento nas propriedades energéticas e biomassa de Eucalyptus benthamii Maiden et Cambage*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Centro-Oeste, PR, Brasil. 76 p.

- Wu, S., Y. Zhu, J. Xu, Z. Lu, G. Chen, P. Song, W. Guo, Y. Zhu, J. Xu, Z. Lu, G. Chen, P. Song, W.G. Genetic, S. Wu, Y. Zhu, J. Xu, Z. Lu, G. Chen, P. Song, W. Guo. (2017). Genetic variation and genetic gain for energy production, growth traits and wood properties in Eucalyptus hybrid clones in China. *Australian Forestry*, 80, 57–65. <https://doi.org/10.1080/00049158.2016.1275948>
- Zanuncio, J.A.V, A.G. Carvalho, P. F. Trugihó, T.C. Monteiro. (2014). Extractive and energetic properties of wood and charcoal, *Árvore*, 38, 369–374.

Evaluación del potencial uso de la cáscara de arroz para el abastecimiento eléctrico a los molinos arroceros en la Provincia de Entre Ríos. Argentina

Carñel G.E.* , Alessandri G., Duarte O.C., Francia A. y Díaz E.L.

Facultad de Ciencias Agropecuarias. UNER, RP 11, km 10.5, 3101 Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.

*Autor para correspondencia: gcarñel@gmail.com

1. Introduction

Los eslabones involucrados en la cadena de arroz son tres: la producción agrícola, el procesamiento industrial y la comercialización. En la producción agrícola se obtiene el arroz cáscara, que luego en el procesamiento industrial se destina a la molienda. Allí se somete el arroz cáscara a un proceso de secado y descascarillado, para hacerlo comestible. Así se obtiene el arroz integral. Luego se realiza un segundo descascarillado, para eliminar el salvado y el germen, el paso final es el pulido, tras lo cual se obtiene un arroz con aspecto blanco brillante.

Es aquí donde, en esta etapa de la cadena del arroz, surge el valor de la cadena industrial representado por los molinos arroceros, los que para su funcionamiento y cumplir con los requerimientos de la calidad industrial requieren la provisión de energía eléctrica para alimentar durante el período de producción las instalaciones.

Las industrias se encuentran vinculada a la red eléctrica de alta tensión. En la Provincia de Entre Ríos la distribución la realiza, como distribuidora mayorista, ENERSA (sociedad anónima del Estado Provincial) y Cooperativas Eléctricas que toman energía de la Red de ENERSA y la distribuyen a los productores agropecuarios mediante redes propias de 13.2 kV y de 380 voltios. En las cooperativas los principales usuarios son productores agropecuarios de baja carga (del orden de 5 a 10 kw de potencia de los transformadores individuales conectados a las redes de 380 voltios). Durante el período de riego, algunos productores arroceros se abastecen de energía eléctrica para el funcionamiento de sus bombas, y estos consumos implican transformadores de mayor potencia de hasta 50 kw.

El arroz requiere condiciones ecológicas para su desarrollo, en cuanto a temperaturas, agua y luminosidad. Su producción tiene la particularidad de requerir riego, y se requieren grandes láminas ya que se aplica principalmente el sistema de riego por inundación durante un período de al menos 100 días.

La producción primaria está concentrada en el litoral argentino, por el tipo de clima y de suelo de la región, que favorece la inundación necesaria para el cultivo. Las principales provincias productoras son Corrientes (45%) y Entre Ríos (36%). Ambas representan el 81% de la producción total del país, mientras que el 19% restante se reparte entre las provincias de Santa Fe, Formosa y Chaco. La provincia de Corrientes, si bien se caracteriza por una fuerte participación en la etapa primaria, procesa casi toda su producción en Entre Ríos. Los principales molinos arroceros también se ubican en el litoral argentino. En 2016, Entre Ríos procesa aproximadamente el 79%, Santa Fe el 15%, Chaco el 3%, Corrientes el 2% y Misiones el 1%, la producción alcanzó a 1,4 millones de toneladas, ver Figura 1. En la provincia de Entre Ríos el cultivo de arroz se realiza conformando una cadena agro-industrial con una fuerte integración geográfica. La materia prima producida en la región es procesada por la industria molinera local casi en su totalidad. La molienda es aún más significativa por cuanto se procesa arroz proveniente de otras provincias, esta actividad dentro de la cadena para el año 2017 procesó 697.950 toneladas, esta particularidad se debe la concentración de una considerable capacidad industrial nacional del sector arrocero instalada en la región.

Calzada *et al* (2016) identificaron 28 molinos arroceros, de los cuales 24 podrían procesar diariamente arroz con cáscara y 25 de ellos, arroz blanco. La capacidad de elaboración diaria en forma conjunta de todas las empresas nacionales en el producto "arroz con cáscara" ascendería a 3.461 t/día. En 330 días de operación en el año, este conjunto de molinos tienen un potencial de elaboración anual 1.142.000 de toneladas, Hinrichsen J.J. S.A. (2016). En lo referido a la capacidad de elaboración diaria de todas las empresas nacionales en arroz blanco la misma ascendería a 2.473 toneladas por día. A 330 días de operación en el año, este conjunto de fábricas podrían procesar -815.000 toneladas de arroz en el año.

En otro orden, la capacidad de almacenaje de los molinos arroceros relevada por J.J. Hinrichsen S.A. sería de 524.500 toneladas, compuesta por 425.500 toneladas en silos en Planta molineras y 99 mil toneladas en campo. Esta capacidad de almacenaje de todos los molinos arroceros permitiría guardar aproximadamente el 33% de la producción nacional de arroz.

El principal molino arrocero argentino, en cuanto a capacidad de elaboración diaria, es Molinos Libres S.A. del grupo Glencore, ubicado en Paso de los Libres (Corrientes). Esta planta tiene posibilidades de procesar cerca de 600 toneladas/día y casi 200 mil toneladas en el año de arroz con cáscara y cuenta con otro molino en Chajarí con 200 toneladas/día de procesamiento en Entre Ríos y acopios en Los Conquistadores (Entre Ríos) y Bonpland (Corrientes).

Adecoagro cuenta con dos molinos, uno en Mercedes (Corrientes) y otro en San Salvador (Entre Ríos). Por otra parte deben mencionarse los molinos de las Cooperativa Agrícola "Gral. San Martín" Ltda localizada en Los Charrúas (Entre Ríos), b) las Cooperativas Agrícola "Lucienville" Ltda ubicada en Basavilbaso (E.R.), c) la Cooperativa Arroceros de San Salvador Ltda en San Salvador (E.R.), d) la Cooperativa Arroceros y Tabacalera "12 de octubre" en Goya (Corrientes), e) la Cooperativa Arroceros de Villa Elisa (E.R.) y la Cooperativa Urdinarrain Ltda de Urdinarrain (E.R.). Estas seis cooperativas tienen una capacidad de procesamiento conjunto de 800 toneladas/día de arroz cáscara.

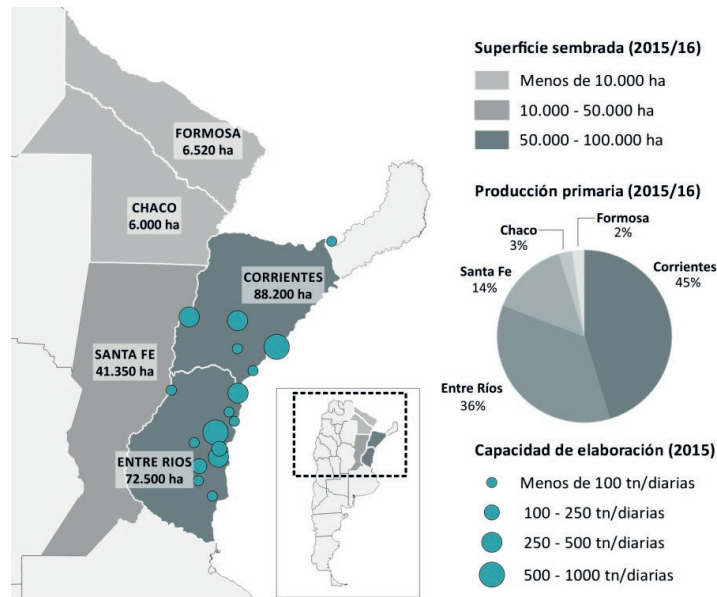


Figura 1. Mapa de ubicación de las áreas de producción y de los molinos arroceros.

Fuente: Ministerio de Agricultura (2016).

Se dispone de una masa total de 300.000 ton/año, y 8.000 horas anuales de operación, se dispone de un total medio de residuos de cáscara de arroz de 37,5 t/h. Si se asume un rendimiento global del 25%, este volumen horario permitirá generar aproximadamente 33 MW. Existen problemas si se quema cáscara de arroz junto con la pajilla. Por ello es aconsejable plantear centrales alimentadas exclusivamente a partir de cáscara de arroz.

La alternativa más conveniente desde el punto de vista logístico es construir una Central Térmica única en la localidad de San Salvador de 7.5 MW y una segunda de 2.0 MW en Villaguay.

Tabla 1. Relevamiento de potencia requerida por localidad de los Molinos Arroceros.

Localidad	Potencia kW	Prestador
Chajarí	612	Enersa
Chajarí	315	Coop.Chajarí
Col. El Pantanoso- 3 de Febrero	36	Coop.Gral.Urquiza
Colonia La Suiza	29	Coop.Gral.Urquiza
Colonia San Huberto	42	Coop.Gral.Urquiza
Concordia	254	Coop.Concordia
Guauguaychú	254	Coop.Guauguaychú
La Clarita	225	Enersa
La Paz	337	Coop.La Paz

(Tabla 1, continúa en la página siguiente)

(Tabla 1, continúa de la página anterior)

Localidad	Potencia kW	Prestador
Los Charruas	329	Enerisa
San Salvador	3665	Enerisa
Villa Clara	74	Enerisa
Paraná	270	Enerisa
Villa Elisa	600	Enerisa
Villaguay	895	Enerisa
Total Potencia	7937	

2. Objetivos

Se plantea como objetivo principal evaluar la potencialidad de la autogeneración de energía eléctrica por parte de los molinos arroceros durante el período del procesamiento de los granos de la campaña.

Evaluar, si el exceso de materia prima (cáscara de arroz) no consumida en el período del proceso industrial permitiría inyectarla a la red de energía eléctrica de la distribuidora provincial (ENERSA) o a las cooperativas eléctricas.

Determinar la incidencia en la potencia requerida de la red, y estimar la incidencia en la potencia fría a pagar en el período sin producción.

Analizar la legislación de la Provincia de Entre Ríos vinculada a los aspectos de generación de energía a partir de biocombustibles, y de rol de un prosumidor de energía eléctrica.

3. Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados se siguió un proceso metodológico que consistió en:

- recopilar la información de los molinos arroceros de la Provincia de Entre Ríos. La información requerida fue capacidad instalada, producción, potencia eléctrica requerida de la red de distribución y capacidad de almacenamiento del exceso de cáscara de arroz en el período del consumo con destino al tratamiento del arroz cáscara para transformarlo en arroz comercial.
- Evaluar la capacidad calorífica de la cáscara de arroz y expresarla en calorías por gramo de cáscara.
- Determinar la cantidad de toneladas de arroz cáscara necesarias para producir 100 kw de energía.
- Para cada molino, en función de la producción de arroz elaborado y el requerimiento de toneladas de cáscara de arroz cuantificar la potencial energía a consumir.
- Verificar si es posible suministrar la energía requerida durante el proceso de la campaña molinera de transformación de arroz grano a arroz comercial, y si es posible disminuir la potencia requerida al distribuidor de energía eléctrica (ENERSA o Cooperativas).

- f. Analizar los aspectos legales de la generación de energía eléctrica a partir de biocombustibles.
- g. Evaluar la incidencia en la generación de GEI por la sustitución de la quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica por recursos renovables como la cáscara de arroz.

4. Resultados

ENERSA (2009) con fondo de la UNPRE realizó un relevamiento de los molinos arroceros por localidad, ver Tabla 1. La base de datos utilizada para el cálculo de este trabajo se basó en la información proveniente de la Fundación PROARROZ, ver Tabla 1, donde se señala el nombre comercial del molino, su ubicación, capacidad instalada, horas de trabajo anual y potencia eléctrica, ver Tabla 2. No se pudo disponer de la información de 7 de los molinos radicados en la Provincia de Entre Ríos.

Tabla 1. Número de Molinos Arroceros por Localidad.

Localidad	Cantidad
San Salvador	13
Guauguaychú	10
Villaguay	6
Villa Elisa	6
C del Uruguay	6
Los Charrúas	3
Urdinarrian	3
Basavilbaso	3
La Paz	2
Concordia	2
Paraná	2
La Paz	2
Hasenkamp	1
Villa Mantero	1
Chajarí	1
Crespo	1
San José	1

Fuente: ENERSA (2009).

Evaluación del potencial uso de la cáscara de arroz para el abastecimiento eléctrico a los molinos arroceros en la Provincia de Entre Ríos. Argentina
Carñel et al.

Tabla 2. Resumen de la base de datos de los molinos arroceros. Provincia de Entre Ríos.

Nombre comercial	Localidad	Cascara	Blanco	Secado	Almacenamiento
Aguador S.A.C.I.A.	La Paz	24	17		10000
Arroceros de Villaguay S.C.L.	Villaguay	48	36	320	7800
Carmabe S.A.	San Salvador	100	60	200	12000
Caupolican S.C.	San Salvador	50	10	480	20000
Cia. de Granos Mercosur	San Salvador				
Coop. A.S. Salvador Ltda.	San Salvador	150	90	350	10000 ó 140000
Coop. Agrícola Luisenville Ltda.	Basabilbaso	110	70	400	10000
Coop. Agrícola Urdinarrain Ltda.	Urdinarrain	36	20	200	35000
Coop. Arroces V. Elisa	Villa Elisa	260	156	1000	43000
Coop. Agrícola S. Martín Ltda.	Los Carruas	90	50	320	700
Corográn S.A.	La Carita	150	110	400	10000
Dos Hermanos S.A.	Concordia	68	68	450	8000
Duval Flores S.A.	La Paz				
Glencore	Chajarí	280	140	600	25000
La Loma Srl	Los Charrúas				
Ladislao Popelka y Cia.	Paraná				
Marcos Schmukler S.A.	San Salvador	180	100	720	23000
Molino Arroceros El Lago S.R.L.	Chajarí	100	60	600	14000
Molino Arroceros Sasti	San Salvador				
Molino Arroceros S. Sequeira	San Salvador				
Molino Río de La Plata	C. del Uruguay		400		
Molinos Centro S.R.L.	Villaguay				
Paoloni y Cia. S.R.L.	San Salvador	100	60	500	7100
Pilagá S.A.	San Salvador	300	200	1400	20000
Semillas y Cereales S.R.L.	Villaguay				

Fuente: PROARROZ y Hinrichsen S.A., (2016).

La capacidad calorífica del arroz es una variable que depende de muchas características, entre ellas su composición química, el contenido de azufre, la humedad, etc. La bibliografía indica que los valores de referencia se encuentran comprendidos entre 13.18 y 15.64 Mj/kg, que equivale de 3200 a 3700 calorías por cada gramo de cáscara de arroz. Por ello, y adoptando los valores más conservadores se puede estimar que es necesario disponer de 1830 kg/hora de cáscara de arroz para producir 100 kw/hora. Como dato de referencia el gasoil posee un poder calorífico de 8.600 kcal por litro

El principio básico del sistema de generación de energía de gasificación de biomasa de cáscara de arroz de POWERMAX (abreviado como BGPS) es convertir la cáscara

de arroz, el casco de arroz en gas combustible. Luego se utiliza como combustible en el motor de gas para generar electricidad. La gasificación de la biomasa conquista con éxito las desventajas de la biomasa de cáscara de arroz, como la baja inflamabilidad y la amplia diversidad. Es una de las formas más efectivas de utilización de la biomasa. La humedad de cáscara de arroz deberá ser inferior al 20%, basado en los esquemas planteados por Teneng Power Machinery Co., Ltd. La Tabla 3 presenta una síntesis de las características de demanda horaria de biomasa de cáscara de arroz en Kg/hora para distintas potencias instaladas y la producción de gas en Nm³/h. Tecnología basada en gasificador de lecho fluidizado circulante. Requisito de humedad de biomasa 20 % (base húmeda) y finalmente el requisito de tamaño de biomasa es de 8-15mm.

Tabla 3. Consumo de biomasa y producción de gas para distintas potencias instaladas.

Variables energéticas	Potencia Instalada (Kwh)								
	200	400	500	600	800	1000	1200	1500	2000
Consumo de biomasa (Kg/hr)	200-360	400-720	500-900	600-1080	800-1440	1000-1800	1200-2160	1500-2700	2000-3600
Producción de gas (Nm ³ /h)	500-600	1000-1200	1250-1500	1500-1800	2000-2400	2500-3000	3000-3600	3750-4500	5000-6000

La Tabla 4 presenta, para cada uno de los molinos analizados, la potencia capaz de ser suministrada por un equipo de generación eléctrica a lo largo de toda la campaña de molienda de 330 días, consumo de cáscara de arroz, excedente, y potencia disponible para inyectar en la red fuera del período de procesamiento. La Figura 2 presenta la distribución del potencial de bioenergía de los 26 molinos analizados de la Provincia de Entre Ríos.

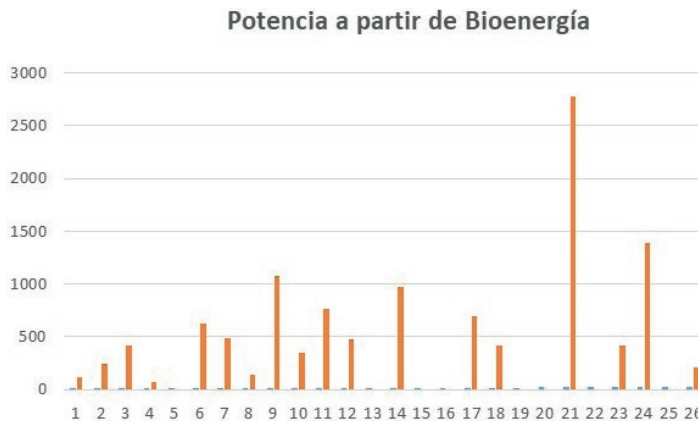


Figura 2. Potencial de generación de bioenergía a partir de cáscara de arroz de los molinos analizados.

Tres de molinos arroceros pueden garantizar una capacidad de generación de energía eléctrica superior a 1 Mwh de potencia instalada.

Tabla 4. Síntesis de los Resultados del análisis a nivel molino.

Orden	Molino	Potencia a partir de cáscara de arroz (kwh)
1	Aguador S.A.C.I.A.	118
2	Arroceros de Villaguay S.C.L.	250
3	Carmabe SA	417
4	Caupolican SC	69
5	Cia. de Granos Mercosur	
6	Coop. A. S. Salvador Ltda.	625
7	Coop. Agrí. Luisenville Ltda	486
8	Coop. Agrícola Urdinarraín Ltda.	139
9	Coop. Arroceros V. Elisa	1083
10	Coop.Agric. S. Martín Ltad	347
11	Corográn S.A.	764
12	Dos Hermanos S.A.	472
13	Duval Flores SA	
14	Glencore	972
15	La Loma Srl	
16	Ladislao Popelka y Cia	
17	Marcos Schmukler SA	694
18	Molino A. El Lago S.R.L.	417
19	Molino Arrocerero Saati	
20	M. Arrocerero S. Sequeira	
21	Molino Río de La Plata	2778
22	Molinos Centro SRL	
23	Paoloni y Cia SRL	417
24	Pilagá S.A.	1389
25	Semillas y Cereales SRL	
26	Unión Cerealera S.A.	208

5. Conclusiones

En la Provincia de Entre Ríos el conjunto de los molinos arroceros producen 183.632 toneladas de cáscara de arroz, que podrían transformarse en bioenergía con una potencia instalada en los 26 molinos arroceros de 11,65 Mwh.

6. Referencias

- Calzada J. y C. Frattini. (2016). *La arrocera es una de las más importantes cadenas de valor*. Elaborado para la Bolsa de Cereales de Rosario. <https://www.on24.com.ar/negocios/agro/la-arrocera-es-una-de-las-ms-importantes-cadenas-de-valor/>. Visita 12 de junio de 2020.
- ENERSA (2009). *Estudio de Prefactibilidad de generación de energía eléctrica utilizando biomasa*. Estudio 1.EE.273. 38 páginas.
- INTA (2019). *Plan de Gestión Integrada de Riesgos en el Sector Agropecuario de la Provincia de Entre Ríos*. 219 páginas.
- Hinrichsen J.J. S.A. (2016). *Anuario 2016*. Edición N° 51.

Cuantificación y caracterización del residuo industrial de corteza de origen forestal en la margen argentina del río Uruguay, y su potencialidad bioenergética

Díaz O. A., Martín M. S. y D. Bechelli

Facultad Regional C. del Uruguay, UTN, Ing. Pereira 676, 3260 Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina.

Correspondencia: EA.grupoacademicofrcu@gmail.com

1. Introducción

Del análisis conjunto de las Provincias involucrada en el área de estudio, Figuras 1, 2 y 3, en la provincia de Entre Ríos, el desarrollo forestal está concentrado en la margen derecha del Río Uruguay en el norte de la provincia abarcando un 80% del total producido y otra mínima en el Delta del Río Paraná destinado, fundamentalmente, a la producción de pasta de papel prensa.

Por otra parte, en la provincia de Corrientes, debido a la barrera natural que representa los Esteros del Iberá, se puede encontrar que la producción está perfectamente diferenciada sobre la costa del Uruguay y sobre el norte de la costa del Paraná. Además presenta una fuerte incidencia un origen de aserrado de especies nativas que luego han evolucionado a especies implantadas, y por lo tanto el grueso de la industria se ubica sobre el centro-norte de la provincia, cerca del límite con la Provincia de Misiones.

Finalmente en la provincia de Misiones el esquema productivo principal se encuentra desarrollado sobre la costa del Paraná con una mínima producción en la zona centro y este asociada al a la margen derecha del Río Uruguay. Esta situación está estrechamente vinculada al desarrollo histórico de la provincia y las mejores posibilidades que ha dado el Río Paraná como medio de transporte fluvial para los productos generados.

Cuantificación y caracterización del residuo industrial de corteza de origen forestal en la margen argentina del río Uruguay, y su potencialidad bioenergética
Díaz et al.



Figura 1. Detalle parcial de América del Sur y el área de estudio.



Figura 2. Mesopotamia Argentina.



Figura 3. Zona de influencia considerada. Margen derecho del Río Uruguay.

2. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivos evaluar la masa forestal, producto de los residuos no utilizados en la etapa industrial forestal instalada en las Provincias de Corrientes, Misiones y Entre Ríos en la margen derecha del Río Uruguay.

Analizar las alternativas industriales de generación de energía eléctrica.

Evaluar la legislación de las provincias involucradas y su adhesión a la Ley Nacional 27.191

3. Metodología

Selección de las especies

El análisis se plantea sobre las especies implantadas como materia prima cuyo destino es la de la industrialización, este criterio permite plantear soluciones sobre sistemas sustentables que tengan reposición y que el desarrollo en el tiempo promueva la plantación de estas, propiciando el crecimiento de la industria. Si bien existe una importante producción de mediano/alto valor agregado a partir de especies nativas y las provincias han controlado significativamente la tala masiva, el hecho de utilizar estos residuos como materia

prima para producción de energía no limitaría el desarrollo de alternativas a largo plazo. Las especies que se evaluaron fueron Coníferas (pino elliotti principalmente) y latifoliadas (eucaliptus y salicáceas). Las salicáceas están destinadas básicamente a la industria del papel prensa y/o respaldo para la construcción de muebles.

La Tabla 1 presenta el análisis, a partir de la Encuesta Nacional 2017, de la industria maderera y de papel para las tres provincias del área de estudio. Se indica el personal ocupado, la capacidad instalada, el volumen en metros cúbicos de la materia prima (rollizo) y el desglose de la producción en la primera etapa de transformación y en la re-manufactura.

Tabla 1. Síntesis de la Encuesta Nacional de desarrollo forestal argentino para las provincias del área de estudio. Fuente D.N.D.F.I. Sec. de Agricultura de la Nación (2017).

PROVINCIA	PERSONAL OCUPADO		CAPACIDAD INSTALADA (m³)	MATERIA PRIMA Rollizo (m³)	PRODUCCIÓN (m³)	
	Permanente	Temporario			1° Transformación	Re manufactura
Corrientes	791	52	371.486	507.004	171.538	55.453
Entre Ríos	249		37.735	91.551	31.406	1.887
Misiones	1.389		1.007.075	1.310.589	458.168	195531
TOTAL	2429	52	1.416.296	1.909.144	661.112	252.871

La Tabla 2 presenta para cada una de las especies utilizadas el tonelaje correspondiente a las provincias estudiadas y el total de la misma.

Tabla 2. Origen de los rollizos. Fuente: Encuesta Nacional de desarrollo forestal argentino para las provincias del área de estudio. Fuente D.N.D.F.I. Sec. de Agricultura de la Nación (2017).

ESPECIES UTILIZADAS	LUGAR DE ORIEN DE LOS ROLLIZOS (Tn)			TOTAL (Tn)
	Corrientes	Entre Ríos	Misiones	
Araucaria			12.852	12.852
Eucaliptos	158.405	23.506	525	182.436
Pino	533.264	2.216	861.139	1.396.619
TOTAL	691.669	25.722	874.516	1.591.907

Producción y determinación de los focos productivos

A partir de los datos oficiales, publicaciones anuales estadísticas sobre el sector forestal y la industria de la madera se pudieron determinar los valores de extracción y procesamiento de las diferentes especies y a partir de ello se plantearon una serie de criterios

para establecer los potenciales productivos. En este punto se consideraron desde el principio del relevamiento, el criterio de especies.

En la Tabla 3 se resumen por cada una de las provincias y distintas especies arbóreas implantadas de la producción de leña, postes y otros productos. Fuente: Encuesta Nacional del año 2017.

Por otra parte, La Tabla 4 presenta un resumen de la información obtenida del Censo Nacional de Aserraderos para la Provincia de Misiones, y por departamentos la cantidad de aserraderos, materia prima y masa de corteza. ver Figura.

Tabla 3. Análisis por provincia para las distintas especies arbóreas implantadas de la producción de leña, postes y otros productos. Fuente: Encuesta Nacional año 2017.

PROVINCIA	ESPECIES	ROLLIZOS	LEÑA	POSTES	OTROS PROD.	TOTAL	
		m ³	Tn	Tn	Tn	Tn	
CORRIENTES	Eucalipto	1.411.765	1.200.000		124.483	12.240	1.336.723
	Pino	3.500.000	2.800.000				2.800.000
	Otras (***)	1.236	915				915
	SUBTOTAL	4.913.001	4.000.915		124.483	12.240	4.137.638
MISIONES	Araucaria (****)	624.990	531.242		31	150	531.273
	Eucalipto (****)	343.159	291.685	74	670		292.579
	Kiri (****)	8.225	3.372				3.372
	Paraíso (****)	15.295	10.324				10.324
	Pino (****)	5.232.248	4.185.798	29	53		4.185.880
	Otras (****)	16.946	12.540	47			12.587
	SUBTOTAL	6.240.863	5.034.961	150	754	150	5.036.015
ENTRE RÍOS	Álamo (***)	28.848	20.194				20.194
	Eucalipto (***)	2.350.451	1.997.883		16.730	29.031	2.043.644
	Pino (***)	184.052	147.242				147.242
	Sauce (***)	50.988	38.241				38.241
	SUBTOTAL	2.614.339	2.203.560		16.730	29.031	2.249.321

(***) Datos estimados a partir de la actividad industrial.

(****) Datos corregidos por la industria.

Elaborado por la Dirección de Innovación y Competitividad Foresto Industrial.

Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial - SECRETARIA DE AGROINDUSTRIA.

Encuesta Anual de la Industria Maderera y del Papel - SECRETARIA DE AGROINDUSTRIA.

Cuantificación y caracterización del residuo industrial de corteza de origen forestal en la margen argentina del río Uruguay, y su potencialidad bioenergética
Díaz et al.

Tabla 4. Análisis de la Provincia de Misiones a nivel departamental.

Zona	Departamentos	Cantidad de aserraderos	Materia prima (m ³ rolliza)	Masa de corteza (t/año)
1	Apóstoles	17	323499	11646
	Concepción			
	San Javier			
2	Leandro N. Alem	103	471082	16959
	Oberá			
3	25 de Mayo	16	120868	4351
4	Guaraní (oeste)	37	168213	6055
5	Guaraní (este)	18	81833	2946
TOTAL		191	1165495	41957

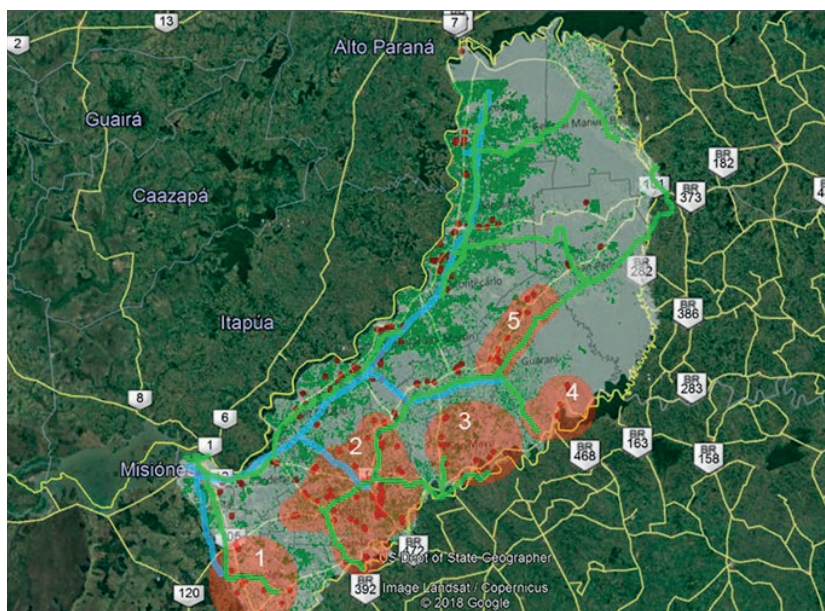


Figura 4. Zonas de influencia consideradas para la Provincia de Misiones.

Optimización de los procesos de extracción de biomasa Sólida para uso energético
 Parte A. Cultivos energéticos y otras fuentes de materia prima

Tabla 5. Análisis de la Provincia de Corrientes a nivel departamental.

Zona	Departamentos	Cantidad de aserraderos	Materia prima (m ³ rolliza)	Masa de corteza (Tn/año)
6	Monte Caseros	15	34809	1253
7	Paso de los Libres	8	17404	626
8	San Martín General Alvear	11	88170	3174
9	Santo Tomé	45	796109	28660
	TOTAL	79	936492	33713

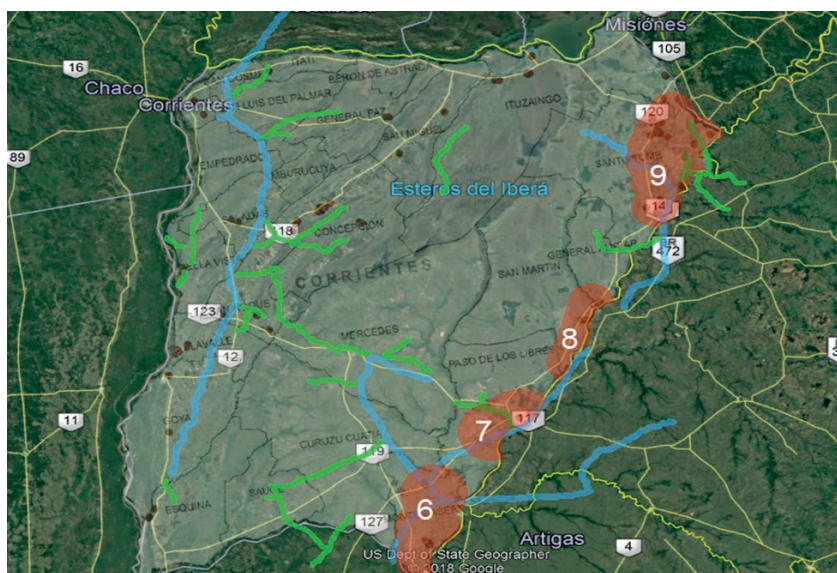


Figura 5. Zonas de influencia consideradas para la Provincia de Corrientes.

Tabla 6. Análisis de la Provincia de Entre Ríos a nivel departamental.

Zona	Departamentos	Cantidad de aserraderos	Materia prima (m ³ rolliza)	Masa de corteza (Tn/año)
10	Uruguay Colón	30	299394	10778
11	Concordia	65	778350	28020
12	Federación	65	778350	28020
	TOTAL	160	1856094	66818



Figura 6. Departamentos analizados de la Provincia de Entre Ríos.

Vinculación

Dado que se presenta una cierta dispersión de la producción y que esto requiere el acopio y unificación del punto de consumo, resulta primordial contar con vinculación terrestre para lograr ese objetivo, este criterio ha sido fundamental en el análisis para definir los sectores y las unidades productivas que aportan al potencial de generación.

A partir de la individualización de las unidades productivas (aserraderos), producción promedio estimada, accesos disponibles (rutas principales y secundarias), redes de distribución (líneas eléctricas de media tensión), se logró determinar zonas posibles de generación de materia prima para abastecer a las unidades de generación eléctrica.

Caracterización y Cuantificación de la Materia Prima como Potencial Térmico.

Con las estadísticas de extracción anual y destino de las especies plantadas con fines industriales, se define como objeto de estudio el Pino Ellioti y el Eucaliptus en todas sus especies maderables.

Como se mencionó anteriormente, se pretenden aprovechar los residuos provenientes de los aserraderos; a fin de no desalentar la producción y el desarrollo de nuevos productos o circuitos existentes de producción, el enfoque se hará sobre la cáscara de eucaliptus y de pino sobre la madera con destino a aserradero que representa aproximadamente el 80% del total de la masa arbórea. Tabla 7.

Tabla 7. Porcentajes de los diferentes componentes del monte.

Destino industrial	Masa (%)
Tocones	1-2
Madera aserrable	70
Cáscara	9-10
Ramas	10

En el proceso de cosecha, ya sea por cuestiones específicas de preservación de la madera como ocurre en el pino o por capacidad de la tecnología disponible como ocurre en gran parte para el eucalipto, los rollizos son transportados con cáscara hasta los aserraderos. Tabla 8.

Tabla 8. Esquema de conformación del rollizo de eucalipto.

Conformación del rollizo	Porcentaje (%)
Madera aserrada (Tablas de 1" y tirantes)	41,5
Aserrín	10,6
Corteza	8 - 10
Despunte y recortes	12,5
Costaneros	25,6

Tabla 9. Análisis elemental y poder calorífico de los distintos combustibles. Fuente: Ogara M.R et al., 1987.

Combustible	Análisis Elemental (% p/p base seca)						Poder Calorífico MJ/Kg (base seca)	
	C	H	O	S	N	Z	Hs	Hi
Chip de eucalipto	48,3	5,8	44,6	<0,1	0,6	0,6	19,6	18,3
Corteza de eucalipto	43,3	5,0	46,8	<0,1	0,8	4,0	16,8	15,7
Residuo de aserrado	46,6	5,9	45,0	<0,1	1,6	0,8	18,7	17,4

Tabla 10. Propiedades seleccionadas de composición de Pino Elliotis del Centro norte de Florida. Purdue University. Center for new crops & plants products.

Componentes	Propiedades de la Biomasa			
	Potencia Calorífica (KJ/Kg)	Densidad ^y (gr/cm ³)	Humedad ^x (%)	Cenizas (%)
Madera	19,749	0,51	99	0,3
Corteza	20,875	0,27	74	0,7
Ramas	19,691	0,41	169	-
Follaje	20,478	-	153	1,9

Fuente: Frampton, (1980) ^yEn base seca ^xEn base seca y madera verde.

Aspectos legales de la generación de energía

El objetivo de estos llamados es que para el 2025 Argentina cuente con una matriz eléctrica constituida por energías renovables en un 20 por ciento, tal como establece la Ley 27.191. Para ello se deberán incorporar unos 10.000 MW de potencia instalada provenientes de renovables.

Además, la Ley Nacional 27.191 establece beneficios fiscales, tributarios y garantías para atraer inversores, mecanismo para llegar finalmente a la meta propuesta. Muchos de estos incentivos son de resorte exclusivo de las Provincias.

Según la normativa nacional, son fuentes de energía renovables la eólica, solar, geotérmica, mareomotriz, hidráulica, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración y biogás. Adicionalmente, la ley provincial considera renovables a las energías hidrocinética, mini hidráulica y la proveniente del hidrógeno.

La ley N° 10.499 dispone la adhesión de Entre Ríos a las disposiciones de la Ley Nacional N° 26.190 y su modificatoria Ley nacional N° 27.191, de "Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica".

Gobierno de Misiones firmó un convenio para impulsar biomasa forestal, en este marco, la Unidad Ejecutora Provincial del Programa de Sustentabilidad y Competitividad Forestal-UCAR MINAGRI, a cargo del Ministerio del agro y la Producción apoyó financieramente a 22 MiPyMES aserraderos y un vivero forestal beneficiarios de planes de incorporación de tecnologías. Permitirá que quienes produzcan energía para su propio consumo, utilizando fuentes renovables, puedan compatibilizar su curva de producción con su curva de demanda, aportando los excedentes a la red pública y compensando ese aporte con la electricidad que en otro momento pudieran requerir", explicó el autor en los argumentos de la norma.

4. Resultados y discusión

Si bien la justificación técnica que permite asumir que la transformación óptima de la energía de la madera es en energía eléctrica, esa discusión queda fuera de análisis del presente. Podemos mencionar si, que existen dos procesos perfectamente desarrollados para generar potencia eléctrica a partir de la biomasa, son los sistemas basados en la Combustión Directa o Indirecta. Para la Combustión Directa, no se presenta otra alternativa más clara a la fecha que el uso del Ciclo Rankine de Potencia; en tanto que para la Indirecta, la gasificación en atmósfera con defecto de Oxígeno para obtención de gas pobre y combustión en un ciclo de aire estándar tipo Otto o ciclo Brayton. El ciclo aire estándar tipo Otto sería la alternativa más factible.

Ambos procesos definidos anteriormente pueden iniciarse a partir de similares condiciones de la materia prima combustible, estas condiciones se definen principalmente por la potencia calorífica, cantidad de energía liberada por kilogramo de sustancia en una oxidación completa de todos sus componentes factible de serlo, y la humedad que afecta significativamente el proceso de aprovechamiento de calor de la sustancia. Por lo tanto, a partir de los valores de potencia calorífica presentados en las Tablas para ambos combustibles

con una corrección por humedad estándar para el buen funcionamiento de ambas tecnologías, se indicarán valores de potencia eléctrica factible de generar considerando la actual tecnología y los rendimientos acotados a las potencias resultantes.

Para el combustible seco puede observarse que los valores de potencia calorífica son similares, pero estos valores deben corregirse por la humedad de los productos, se asumirá un valor de potencia calorífica corregido de 8,8 MJ/Kg (2100 Kcal/Kg) que corresponde a humedades cercanas al 30% comparables a una situación de oreo de un par de meses en la región. La Tablas 11, 12 y 13 presenta las potencias eléctricas expresadas en MW disponible a instalar en los cinco zonas de la Provincia de Misiones, cuatro de la Provincia de Corrientes y tres de la Provincia de Entre Ríos de acuerdo a la producción de biomasa forestal, Figuras 7, 8 y 9.

La evaluación fue realizada considerando 22 jornadas laborales al mes, operando 24 horas al día.

Tabla 11. Potencial eléctrico de las distintas zonas. Provincia de Misiones.

Zona	Potencia (MW)
1	1.44
2	2.10
3	0.54
4	0.75
5	0.36
Total	5.19

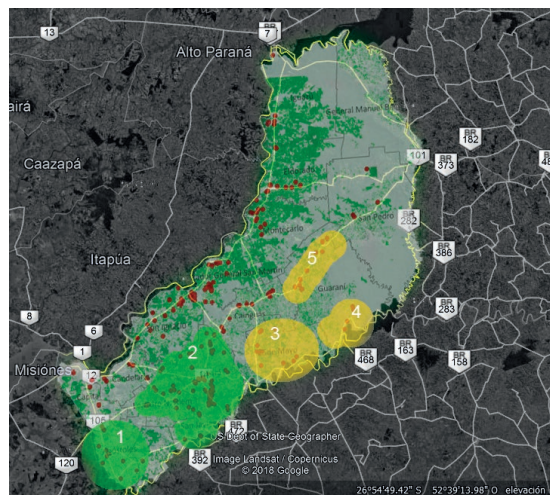


Figura 7. Provincia de Misiones y ubicación de las zonas analizadas.

Cuantificación y caracterización del residuo industrial de corteza de origen forestal en la margen argentina del río Uruguay, y su potencialidad bioenergética
Díaz et al.

Tabla 12. Potencial eléctrico de las distintas zonas. Provincia de Corrientes.

Zona	Potencia (MW)
6	0.15
7	0.08
8	0.39
9	3.54
Total	4.16

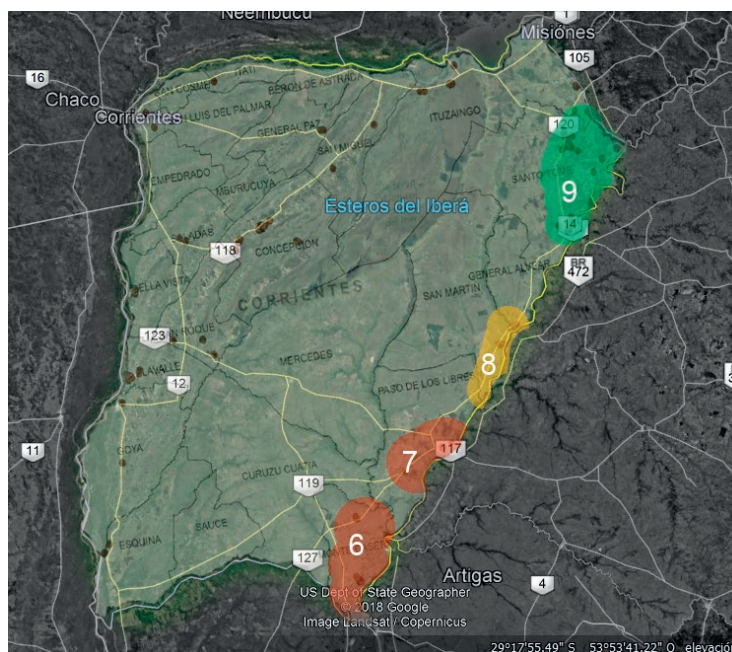


Figura 8. Provincia de Corrientes y ubicación de las zonas analizadas.

Tabla 13. Potencial eléctrico de las distintas zonas. Provincia de Entre Ríos.

Zona	Potencia (MW)
10	1.33
11	3.46
12	3.46
Total	8.25



Figura 9. Provincia de Entre Ríos y ubicación de las zonas analizadas.

5. Conclusiones

El análisis realizado en el presente, muestra una visión muy somera del potencial energético presente en la Margen Derecha del Río Uruguay de la Mesopotamia Argentina para la producción de energía eléctrica a partir de residuos de la industria forestal.

Existen posibilidades de autogeneración dentro de la misma industria generadora o para grupos de empresas ubicadas en cercanía técnica de manera de minimizar costos de logística para la materia prima y la energía eléctrica. Se considera, a partir del conocimiento de la actividad, que la cáscara no es el único subproducto y a partir de diferentes niveles de tecnificación se obtienen otros subproductos viables de combustionar, incluso de mejor calidad.

El marco legal que rige para la generación de potencia de baja y mediana escala, en los límites de potencia y la posibilidad comercializar o reutilizar entre generadores privados haciendo el transporte mediante la Red Nacional y Provincial de energía eléctrica. Todo esto, además deberá tener en cuenta la legislación local y la posibilidad de que las líneas sean propiedad de diferentes distribuidores.

Es posible instalar 17.60 MW de potencia a partir de la masa de corteza de la industria forestal de las Provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos.

Cuantificación y caracterización del residuo industrial de corteza de origen forestal en la margen argentina del río Uruguay, y su potencialidad bioenergética
Díaz et al.

RESUMEN DE LOS POTENCIALES DE GENERACIÓN ELÉCTRICA POR PROVINCIA Potencial		Alto		Medio		Bajo

Misiones	
Zona	Potencia Eléctrica (MW)
1	1,44
2	2,1
3	0,54
4	0,75
5	0,36
TOTAL	5,19

Corrientes	
Zona	Potencia Eléctrica (MW)
6	0,15
7	0,08
8	0,39
9	3,54
TOTAL	4,16

Entre Ríos	
Zona	Potencia Eléctrica (MW)
10	1,33
11	3,46
12	3,46
TOTAL	8,25

6. Referencias

- CADAMDA (2007). Ficha Técnica Pino Elliotti. <http://www.cadamda.org.ar/portal> - Ingreso: 26 September, 2019, 01:15.
- Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial, INTA EEA Concordia, INTA AER Colón, INTA AER Chajarí. *Informe Censo Aserraderos* – Provincia de Entre Ríos 2015 – Ministerio de Agroindustria de la Nación – Diciembre 2017.
- D.N.D.F.I. Sec. de Agricultura de la Nación (2017). Encuesta Nacional de desarrollo forestal argentino.
- Duke, A. (1983). *Handbook of Energy Crops*. Unpublished - Pinus Elliotti Engelm – Center for new crops & Plants products. – Purdue University – Copyright 2017.
- García, M.A., Flores, M., de la Peña, C., Mastrandrea, C. (2017). Estimación del volumen de rollos aserrables y rendimiento en calidad de Tablas según diferentes esquemas de raleo temprano, en base a resultados de ensayos en distintos suelos. *Presentación en Reunión N°79 Consorcio Forestal Río Uruguay* - Ubajay (Colón, Entre Ríos) – INTA Concordia - 17 de noviembre de 2017.
- Ing Celina Von Haefen - Industrias Forestales, Informe año 2017 – Secretaría de Agroindustria – Ministerio de Producción y trabajo de la Nación. Febrero 2019
- Ing Agr. Susana Brandán; Sra Mariángeles Galderisi – Sector Forestal 2017 - Secretaría de Agroindustria – Ministerio de Producción y Trabajo de la Nación. Diciembre 2018
- INTA EEA Concordia (1995). *Manual para productores de eucaliptus de la Mesopotamia Argentina* – SAGPyA – Ministerio de Economía, Obras y Servicios Públicos – Año 1995.
- Mendez-Vilaz, A. (Ed.) (2015). *Materials and Technologies for Energy Efficiency*- Brown Walker Press – Boca Raton – Florida - USA – 2015.
- MSc F Gustavo Daniel Braier – Plan Foresto Industrial de Corrientes - <https://recursosforestales.corrientes.gob.ar> – Agosto 2010.
- NEA Misiones Forestal - <http://neamisionesforestal.blogspot.com/> - Información técnica – Acceso Abril 2020.
- Unidad para el Cambio Rural – Argentina: Plantaciones Forestales y gestión sostenible. Ministerio de Agricultura Ganadería y pesca. Producción Forestal – Febrero 2015.

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

Producción de energía eléctrica a partir de biomasa forestal. Caso de estudio. Parque industrial Santa Rosa. Corrientes. Argentina

Díaz E. L. *, Duarte O. C. y G. E. Carñel

Facultad de Ciencias Agropecuarias, UNER, Ruta Provincial 11, Km 10.5, Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.

*Autor para correspondencia: eduardo.diaz@fca.uner.edu.ar

1. Objetivos

Evaluar el potencial de producción de bioenergía a partir de la masa forestal en la Provincia de Corrientes basada en la utilización del aserrín de las plantas de producción de muebles, cajones y postes de alumbrado y de espaldares de viñedos y tomateras.

Caracterizar el beneficio ambiental por el uso de los residuos de los aserraderos y la disminución en el cambio climático por la generación de energías renovables, denominada oferta indirecta.

2. Introducción

Los regímenes de incentivo implementados desde 1948 generaron aproximadamente 1.300.000 hectáreas de forestaciones, que abastecen el 95% de la demanda industrial, permitiendo el desarrollo de cadenas forestales en casi toda la Argentina.

Por la Ley 6503 del 16 de Septiembre de 2019, la Provincia de Corrientes adhiere al Régimen de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable integrada a la Red Eléctrica Pública, de acuerdo a la Ley Nacional 27.424. Por ello exime del pago del Impuesto sobre los Ingresos Brutos a los ingresos obtenidos por la actividad de inyección a la red de excedentes de energía eléctrica generada y del Impuesto de Sellos a los instrumentos que se suscriban para el desarrollo de la actividad de generación eléctrica de origen renovable por parte de los usuarios de la red de distribución para su autoconsumo y para la eventual inyección de excedentes a la red.

La Provincia de Corrientes posee 130 MW de Potencia instalada de energías renovables, siendo la provincia del NE Argentino que más aportes hace.

El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), elaboraron el trabajo "Análisis espacial del balance energético derivado de Biomasa metodología Wisdom provincia de Corrientes" (2019), llevado a cabo, a partir de una Carta Acuerdo firmada entre el equipo técnico de FAO fue el encargado de disponer la información obrante en las diversas instituciones para la implementación de la metodología WISDOM y de realizar la capacitación y transferencia metodológica a los expertos locales.

El método WISDOM (FAO) está destinado a proporcionar varios beneficios: a) permitir una visión coherente y holística del sector energético de la madera y ayudar a determinar las áreas prioritarias para la intervención; b) permitir la definición de lagunas críticas de datos resultantes de la revisión exhaustiva y la armonización de los datos de energía de la madera; c) promover la cooperación y las sinergias entre las partes interesadas y las instituciones (como las de la silvicultura, la agricultura, la energía y el desarrollo rural); en esto, WISDOM combate la fragmentación que limita en gran medida el desarrollo del sector - y, d) para permitir la concentración de acciones a objetivos circunscritos y, por lo tanto, optimizar el uso de los recursos disponibles (humanos, institucionales, financieros y otros).

Las fuentes de oferta identificadas, localizadas y cuantificadas, en función de su origen, fueron las siguientes:

Oferta directa: cultivo de pino (38,02%), arroz (22,40%) bosques nativos (19,77%), cultivo de eucalipto (12,06%), citrus (3,38%), té (2,45%), yerba mate (1,01%), otras forestaciones (0,88%) y tabaco (0,03%).

Oferta indirecta: industria forestal (55,0%), molinos de arroz (40,2%), industria juguera (3,9%) y molinos yerbateros (0,9%).

Con respecto al consumo de biomasa con fines energéticos, los sectores más demandantes fueron los molinos de arroz y de yerba mate y la industria juguera, que en conjunto representan el 75,7% de la demanda total; lo restante corresponde al consumo residencial, y de las escuelas rurales.

La oferta directa provincial accesible, física y legalmente, es de 2129580 tn/año, mientras que la oferta indirecta es de 401477 tn/año. Por su parte, la demanda actual estimada es de 316920 tn/año. Por ello el balance resultante entre la oferta potencial y el consumo actual estimado da un superávit de 2214137 tn/año de recursos biomásicos con fines energéticos.

A partir de lo señalado la Provincia de Corrientes posee un gran potencial bioenergético, principalmente porque cuenta con la mayor superficie de bosques implantados del país, que ofrecen un volumen considerable de biomasa susceptible de ser aprovechada para producir energía renovable. Por ello se considera que es posible desarrollar políticas bioenergéticas sustentables, a través de proyectos que aprovechen la energía derivada de biomasa.

Por otra parte, la demanda de consumo de electricidad en la provincia de Corrientes superó su récord "histórico" con 670 Mw el 9 de enero de 2020 a partir de la información suministrada por la Dirección Provincial de Energía de Corrientes. La Figura 1 presenta la demanda a lo largo del día, el pico del consumo coincide con el período comprendido entre las 15 y las 16 horas. Los valores mínimos del día entre las 6 y 8 horas de la mañana

oscilaron en los 450 Mw, los que superan en 100 Mw el valor del día y el semestre anterior. Por ello el Sistema Interconectado eléctrico debe estar en condiciones de responder a esa demanda instantánea.



Figura 1. Consumo Horario del día 9 de Enero de 2020. Mayor demanda instantánea histórica de la Provincia de Corrientes. Fuente: Dirección Provincial de Energía de Corrientes.

En la localidad de Gobernador Virasoro está en construcción un proyecto de dos centrales térmicas de generación de energía eléctrica, El mismo consiste en dos centrales térmicas para generar energía eléctrica a partir del aprovechamiento de los subproductos de las industrias forestales y de la producción forestal. Para ello utilizarán en el proceso aserrín, chip, raleo y residuos forestales, Garruchos y San Alonso), producirán 40 MW de potencia que se volcarán al servicio eléctrico a cargo de CAMESSA. Los mismos pertenecen a la Empresa Fuentes Renovables de Energía S.A. (FRESA).

Para tomar dimensión de la envergadura del proyecto, diariamente, de lunes a viernes, FRESA demandará 150 camiones de materia prima por central. Por eso en el lugar habrá tres básculas para el ingreso de camiones; siete hectáreas dedicadas a la playa de biomasa y acopio; tres plataformas volcadoras; dos chipeadoras; un silo de biomasa conectado a la plataforma volcadora y otra que direcciona la materia prima desde el silo a la caldera.

Las inversiones de capital requeridas para las centrales eléctricas de biomasa son bastante altas; el promedio ponderado global de los costos totales de instalación de los proyectos de instalaciones eléctrica a partir de biomasa fue de 1.850 EUR/kW en 2018, con costes más altos en Europa (IRENA, 2018). Las inversiones de más de 30 a 80 millones de euros. Además, a pesar de que el mercado de productos finales está asegurado, aún existen riesgos asociados con el gran volumen de biomasa que debe movilizarse para la operación continua de una planta eléctrica.

Debido a su tamaño las plantas de generación de electricidad a partir de biomasa deben cumplir con los requerimientos legales de la Provincia de Corrientes y los mismos están regulados por el Instituto Correntino del Agua y Ambiente (ICAA) que exige el cumplimiento de presentación de Evaluación Ambiental de la Planta de Generación.

La principal ventaja de apuntar al mercado del mercado eléctrico es que el consumo de esta biomasa está bastante asegurado; por lo general, las centrales eléctricas de biomasa tienen contratos a largo plazo con la red eléctrica (10 a 20 años), a menudo con precios fijos, estos aspectos han sido resueltos previo al inicio de las inversiones de las centrales en construcción actualmente.

3. Caracterización del Recurso Forestal

El año 2019 finalizó para un ritmo sostenido en las plantaciones forestales en una cifra cercana a las 19.000 hectáreas, donde nuevamente se resalta el predominio del género Eucalipto sobre Pinos. Es el quinto año consecutivo en que la superficie plantada se mantiene en cifras cercanas a las 20.000 hectáreas, lo que permite prever a futuro una oferta sostenida de rollos en sector forestal primario de la provincia que hoy cuenta con 373.269 hectáreas forestadas y distribuidas en las 5 cuencas foresto industriales, ver Figura 2, es la de mayor superficie de bosques implantados.

La superficie forestada se distribuye de mayor a menor de pinos con 263268 ha, eucaliptus 108985 ha y otros cultivos 1016 ha. A diferencia de otras provincias de la Mesopotamia no hay forestaciones de salicáceas.

Sin embargo, de las 8.000.000 de toneladas de madera que produce anualmente, solo el 20 % se industrializa en la misma, el resto se comercializa como materia prima a las provincias vecinas (Misiones-Entre Ríos).

Se estima que la producción de madera en Corrientes aumentará significativamente y será imprescindible que se radiquen nuevas e importantes industrias forestales, capaces de absorber la materia prima para su transformación.

Las especies de mayor interés son *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Pinus elliotti*, *Pinus taeda* y *Pinus caribea* var. *hondurensis*, presentando crecimientos anuales muy interesantes: 25-32 m³/ha/año en pino con turnos de corta que van entre 20-25 años y 40-45 m³/ha/año en eucalipto con turnos de 12-14 años. Expresado en dióxido de carbono resultan valores de 92 a 117 de CO₂/ha/año para el pino, y de 147 a 165 toneladas métricas de CO₂/ha/año para el eucalipto.

El desarrollo de la actividad forestal está acompañado por una constante innovación tecnológica vinculada al material de propagación, a las técnicas de cultivo y la organización de los actores que han transformado al sector en uno de los más dinámicos en los últimos tiempos. Entre los actores claves podemos citar la presencia del INTA Bella Vista y su red de Extensión, los Consorcios Forestales (Corrientes Norte, Corrientes Centro y Consorcio Forestal del Río Uruguay), la Dirección Provincial de Recursos Forestales y el sector empresarial vinculado a la actividad forestal.



Figura 2. Áreas forestadas en la Provincia de Corrientes.

Actualmente Corrientes se caracteriza por tener varias áreas productoras de semilla y huertos semilleros que aseguran la obtención de material genético de calidad. Los viveros que consumen éstas semillas se encuentran registrados y certificados por el Instituto Nacional de Semillas (INASE).

El crecimiento exponencial de las inversiones forestales en bosques implantados se debe en gran medida al excelente impacto económico que ha generado la Ley Nacional N° 25.080 de Inversiones para Bosques Cultivados, sancionada en diciembre de 1.998 y prorrogada en la actualidad por la Ley Nacional N° 26.432.

La continuidad de la Ley 25.080 prevé que se realicen al menos 30.000 ha por año, con una mayor participación de medianos y pequeños productores en la actividad forestal en el marco de la Resolución N° 810/11 (referidas a plantación y actividades silvícolas de bosques cultivados y enriquecimiento de bosques nativos para pequeños productores en forma agrupada).

La industria forestal está conformada por 232 aserraderos (Censo Foresto-Industrial de Corrientes. Ministerio de Producción, Trabajo y Turismo. 2005), 313 carpinterías y 12 impregnadoras con un consumo aparente por año de 1,6 millones de toneladas. De los aserraderos la mayor proporción (57 %) procesa hasta el 500 t/mes, un 25 % entre 500 y 1400 y un 16 % mayor a este volumen. La mayoría de los aserraderos (68 %) tienen bajo nivel tecnológico y el 78 % de los mismos no tienen forestaciones propias. Solamente el 10 % de los aserraderos comercializa sus residuos, con lo cual cerca de 480 mil t/año de costaneros, astillas de aserrín y corteza se desperdician.

Producción de energía eléctrica a partir de biomasa forestal. Caso de estudio. Parque industrial Santa Rosa. Corrientes. Argentina
Díaz et al.

La totalidad de los Parques Industriales, las nuevas estaciones transformadoras, los puertos, las obras privadas como la Planta de producción de energía eléctrica a partir de biomasa, actualmente en construcción en la localidad de Gobernador Virasoro y Santa Rosa, esta última objeto de este análisis, ver Figura 3, y las obras públicas de infraestructura, cuentan con la aprobación ambiental en cumplimiento de la Ley 5.067.



Figura 3. Parques Industriales de la Provincia de Corrientes.

Con el objetivo de potenciar el desarrollo de la generación de energías renovables en la Provincia de Corrientes se basa en la utilización de este recurso, que hoy posee un valor nulo a los efectos económicos y genera una contaminación ambiental importante por el acopio del mismo en las cercanías de los aserraderos, la quema de los mismos, ver Figura 4, Plan de Ordenamiento Territorial Santa Rosa, Corrientes - Fase Propositiva (2017). Por ello se considera que la quema de aserrín a cielo abierto se solucione con la instalación de una Planta de Energía Eléctrica por Biomasa, que reutilizara todos los desechos de la madera para convertirlos en energía que sirva para el Parque Industrial y para la localidad.



Figura 4. Acopio de aserrín.
Fuente: Municipio de Santa Rosa.

Si bien el potencial de crecimiento del sector es enorme, se ve restringido por las deficiencias de infraestructura (especialmente energía eléctrica y transporte), limitaciones de acceso a crédito, falta de disponibilidad de personal técnico capacitado y falta de incentivos regulatorios adecuados en el caso particular de la biomasa forestal, entre otros factores clave.

4. Caracterización Climática

La temperatura media anual máxima de 25° C y una temperatura media anual mínima de 6° C. La temperatura media anual es de 20° C y las precipitaciones son abundantes y oscilan entre los 950 y 1400 mm anuales, que decrecen de noreste a sudoeste. Los periodos lluviosos se dan especialmente en los equinoccios de otoño y primavera, siendo el invierno y el verano las estaciones más secas del año. Se pueden distinguir tres tipos distintos: hacia el noreste, en la zona lindera con la provincia de Misiones, los veranos son muy húmedos y calurosos y llueve mucho en las estaciones intermedias, a lo largo del tramo medio argentino del Paraná, el clima es chaqueño subtropical: seco en invierno, muy caluroso y lluvioso en verano. Finalmente, en los departamentos del sur se manifiesta el clima subtemplado, precipitaciones uniformes durante todo el año, con veranos calurosos e inviernos relativamente frescos. <http://www.todo-argentina.net/geografia/provincias/corrientes/clima.html>. Visita 1 de junio de 2020.

También se distinguen dos áreas de acuerdo con la cantidad de precipitaciones anuales. En la región que bordea el río Paraná llueve menos de 1.100 milímetros, y es menos lluviosa que en las proximidades del Uruguay, donde caen entre 1.200 y 1.600 milímetros. Por lo general no hay sequías en todo el territorio y la temperatura media del verano es superior a los 21 °C, mientras que la de invierno ronda los 10° C.

5. El aprovechamiento de la biomasa forestal

La Provincia ha promocionado la radicación de plantas de producción de energía eléctrica a partir de la utilización de la biomasa forestal. Entre varios proyectos en desarrollo uno de ellos consiste en la instalación de una planta generadora de 18 MV de energía en el Parque Industrial de Santa Rosa, a partir de biomasa de residuos forestales, incluye: planta chipeadora, caldera, turbina y planta de tratamiento de agua. La energía eléctrica generada se destinará a abastecimiento de la red pública desde la ET ubicada en el acceso al Parque Industrial desde la Ruta Nacional 118.

El proyecto se emplazará en el parque industrial Santa Rosa, departamento de Concepción, provincia de Corrientes. Contempla la utilización de residuos de biomasa forestales no utilizados en aserraderos locales (puntas, ramas, recortes de trosas, cortezas, aserrín, etc.), haciendo con ellos chips de madera y aserrín y residuos de biomasa provenientes de la actividad primaria forestal (raleo del monte, etc.), Figura 5. En el mismo se indican los puntos de análisis geofísicos para caracterizar la fuente de agua subterránea con destino a la Planta.

6. Reducción de los gases de Efecto Invernadero (GEI)

El análisis preliminar indica que 1 tonelada de biomasa quemada a través de un sistema de gasificación de biomasa podría producir 0.54 tonelada equivalente de CO_2 (tCO_2e) de reducción de emisiones, The Carbon Basis Company Ltd *et al* (2010).

La planta generadora de energía eléctrica a partir de biomasa comprende el aprovechamiento integral de los residuos forestales. Los mismos serán utilizados como combustible en una caldera, la cual producirá el vapor de alta presión y temperatura. El vapor generado por la caldera es enviado a las turbinas a vapor, donde la energía térmica contenida en el vapor es transformada en energía mecánica. El vapor en alta presión ingresa en el sistema de distribución de la turbina y se expande, pasando por una serie de ruedas con álabes. La turbina girando acciona un generador eléctrico que es transformada en energía eléctrica a través del campo magnético generado con movimiento del rotor con relación al estator. El mismo será capaz de generar 18MW de electricidad, previéndose un régimen de operación de 333 días al año. Los troncos se descargarán en una playa de troncos. Se almacenarán el tiempo preciso hasta que pierdan el 35/40 % de peso en humedad.



Figura 5. Ubicación del Proyecto de Generación de Energía a partir de biomasa forestal. Google Earth. Visita 16 de Junio de 2019.

El sistema de combustión de la caldera debe ser capaz de quemar esas biomásas combustibles, básicamente chips y aserrín combinadas en una relación de masas 70/72 % de chips y hasta 30 % de aserrín o bien solo chips, en proporciones variables de humedad según la disponibilidad del momento.

La biomasa leñosa puesta en la central térmica tendrá una humedad máxima de 52 % y se dispondrá chiheada, con dimensión aproximada de 50 mm x 25 mm x 6 mm de espesor y como aserrín, en las proporciones mencionadas. No obstante, se privilegiará el ingreso a planta de chips de residuos de aserradero con humedades menores. Por otra parte, se recibirán en planta troncos de entre 5 y 15 cm de diámetro provendrán de raleo de montes

de pino y de eucaliptos, constituirán una disponibilidad estimada en 30 % de la biomasa combustible necesaria. La elaboración del chipeado se utilizará como materia prima los troncos más secos.

El resto de biomasa, en dos líneas separadas, una para chip y la otra para serrín, será tratado por el siguiente proceso de acondicionamiento para la eliminación de impropios: separador de piedras de metales y de sobre-tamaños mediante zaranda); para rechazar aquella biomasa con tamaño superior al establecido para su combustión y evitar que sea alimentado a la caldera. La biomasa será almacenada en silos de chips y de aserrín.

Generación de energía eléctrica

Dentro de la caldera se produce la combustión de la astilla y se evapora el agua de proceso hasta las condiciones de entrada a la turbina. Parte del vapor vivo que sale de la caldera se dirige al desgasificador y la mayor parte se dirige a la turbina, la cual está conectada a un generador síncrono donde se produce la electricidad.

El vapor a baja presión que sale de la turbina pasa por un condensador que está conectado a tres torres de refrigeración de tiro inducido. En el condensador, el agua de proceso pasa a estado líquido, y una vez que pasa por el desgasificador donde se extraen los gases disueltos, ésta es introducida nuevamente en la caldera cerrándose así el ciclo.

El sistema de generación de energía eléctrica estará constituido por:

- La caldera generadora de vapor
- Turbina de vapor
- Generador síncrono:
- Condensador
- Desgasificador / tanque agua de alimentación
- Sistemas de refrigeración de agua a través de la entrada de aire situada en la parte inferior de la torre y viajará a contracorriente con el agua, a través del relleno.
- Sistema auxiliar de gasoil: que tendrá como objetivo encender la biomasa, y en el caso de que fuera necesario sacar de servicio la unidad se podría usar el quemador auxiliar para efectuar una parada en forma ordenada y dejar preparado el sistema para un próximo arranque.
- Servicios auxiliares.
- Provisión de agua: se estima en 68 m³/h y su fuente de abastecimiento será agua subterránea.

Tratamiento

El sistema de tratamiento de agua se desglosa en

1. Pretratamiento y filtración.
2. Sistema de Desmineralización.
3. Sistema de potabilización.
4. Agua de refrigeración.

Provisión de Energía Eléctrica

Durante la etapa constructiva se utilizará energía eléctrica proporcionada por la empresa D.P.E.C. (Dirección provincial de Energía de Corrientes). En la etapa operativa la central se autoabastecerá de energía.

Instalaciones y procesos complementarios

Tratamiento de emisiones de caldera.

Captación de material particulado

Control de las emisiones de NO_x

Control de las emisiones de CO₂

Control de las emisiones de SO₂

Control de las emisiones de partículas

Planta de tratamiento de efluentes

Los efluentes generados en la central corresponden a las purgas de las descargas continuas e intermitentes de la caldera, purgas de las torres de enfriamiento y a las purgas del sistema de tratamiento de agua y del sistema de desmineralización / regeneración de las resinas, ver Tabla 1.

Tabla 1. Efluentes industriales.

Origen	Caudal máximo horario puntual [m ³ /h]	Características del efluente	Tratamiento / destino
Circuito de vapor	1,88	Agua alcalina con sólidos disueltos	Ecuilización sedimentación ajuste de pH
Filtros de arena	1,94	Contenido de sólidos en suspensión. 1 lavado de 1h cada 10 hs. 17 lavados/semana	Ecuilización sedimentación ajuste de pH
Rechazo de ósmosis	4	Agua salina	Reutilización a torres de enfriamiento
EDI Electrodeionización	0,002	Agua salina	
Purga del circuito de enfriamiento	11,92	Agua alcalina con sólidos disueltos	Sedimentación ajuste de pH
Caudal efluentes generados	19,7		
Caudal efluentes a vuelco	15,7		

Los efluentes correspondientes al rechazo de ósmosis y de EDI (Electro deionización) se reutilizarán en las torres de enfriamiento.

Tratamiento:

- Purgas del ciclo de agua/vapor: se realizará corrección de pH y decantación de sólidos y posterior descarga al punto de evacuación de aguas residuales de la parcela.
- Purgas torres de refrigeración: se realizará corrección de pH y decantación de sólidos y posterior descarga al punto de evacuación de aguas residuales de la parcela.
- Instalaciones anti incendio.

El sistema de lucha contra incendio cubrirá la protección integral de la Planta. Consiste básicamente en una sala de bombas, dos troncales de distribución en anillo (para garantizar su funcionamiento ante fallas o accidentes de operación) y las derivaciones necesarias para la protección de todos los sectores.

La sala de bombas estará ubicada en las cercanías del tanque de agua contra incendios, que será agua filtrada y tendrá una capacidad de almacenaje de 700 m³ y suministrará de agua al sistema en caso de incendio.

La sala de bombas deberá disponer de un grupo de bombeo integrado por una electrobomba centrífuga, una motobomba centrífuga, y una electrobomba Jockey, diseñada para suministrar agua a todo el sistema con el caudal y presión requeridos.

Desde el troncal principal se alimentarán tanto los sectores protegidos con rociadores, como los sectores protegidos por hidrantes exteriores, hidrantes interiores y monitores.

Taller de mantenimiento

Las actividades a desarrollar por el taller de mantenimiento son de índole de mantenimiento correctivo y preventivo sobre instalaciones mecánicas, cañerías, electricidad, motores, máquinas viales, etc. Equipamiento empleado: herramientas de uso general en la parte mecánica y multímetros para mediciones eléctricas, perforadoras, amoladoras, etc.

7. Mitigación de Gases se Efecto Invernadero (GEI)

La calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero AVERT usa la tasa de emisión marginal de CO₂ promedio ponderada de los Estados Unidos de Norteamérica que permite convertir las reducciones de kilovatios-hora en unidades de emisiones de dióxido de carbono evitadas.

Estimar los efectos de la emisión de Eficiencia Energética (EE) y la Energía Renovable (ER) sobre la red de electricidad requiere calcular la cantidad de emisiones y generación con combustibles fósiles desplazadas por EE y ER. Un factor marginal de emisiones es la mejor representación para calcular qué unidades con combustibles fósiles EE/ER están desplazando en toda la flota de fósiles. Por lo general, no se considera que los programas de EE y ER afecten las centrales eléctricas base que funcionan todo el tiempo, sino las centrales eléctricas de punta que se ponen en línea como necesarias para satisfacer la demanda. Por lo tanto, AVERT proporciona un factor marginal nacional de emisiones para el cálculo de dichas equivalencias.

Los datos de la tasa de emisión marginal de CO₂ promedio ponderada de los EE. UU de acuerdo a AVERT (2018) señalan un valor de 7.07×10^{-4} tm de CO₂/kWh. Por ello, para el

caso de la Planta de Santa Rosa con un funcionamiento de 333 días, la emisión de es de 5650 tm de CO₂. Este valor debe analizarse como el beneficio de la utilización de los residuos de los aserraderos, que actualmente son quemados, y destinados a la generación de energía eléctrica, como un aporte a la reducción al Cambio Climático Global.

8. Conclusiones

La Provincia de Corrientes dispone de una superficie forestal constituida por plantaciones de eucalipto y pinos que se encuentra en condiciones de sustentar, no solo la provisión de madera para los aserraderos, sino que a través del uso del residuo de los aserraderos (astillas, etc) suministrar materia prima para la producción de bioenergía.

Existen Parques Industriales distribuidos en la Provincia con infraestructura necesaria para la implantación de las Plantas de Generación Eléctrica a partir de residuos Forestales, incluyendo estaciones transformadoras para incorporar dicha energía a la red provincial.

La tasa de reforestación y la política provincial garantiza las inversiones con plazos de amortización que hacen rentable la inversión. Existe una demanda local y subsidios nacionales para la inversión en la producción de energías renovables.

El consumo de los residuos de los aserraderos, tiene asimismo un efecto complementario ambiental, al disminuir la quema no controlada de los mismos en áreas urbanas y generar por ello una contribución como reducción de los gases de efecto invernadero de 5650 tm de CO₂/año.

La energía eléctrica es producida de fuentes renovables, con un balance cero neto de carbono. Son productos de desecho que pueden ser obtenidos sin costo desde los aserraderos y de operaciones forestales que de otra manera deberían destinarse a la quema incontrolada para su eliminación.

Las condiciones ecológicas presentan una elevada tasa de producción de madera de 25-32 m³/ha/año en pino con turnos de corta que van entre 20-25 años y 40-45m³/ha/año en eucalipto con turnos de 12-14 años. Finalmente se prevé una tasa de repoblamiento forestal de 30.000 ha/año que permitirá la continuidad de este modelo de producción de energía eléctrica a partir de recursos renovables, como en este caso la biomasa forestal.

Existe una adecuada infraestructura vial para el transporte de la materia prima a las plantas de generación y la ubicación de las mismas en los parque industriales asociados a las Estaciones transformadoras permiten un adecuado vínculo con la red eléctrica provincial.

9. Referencias

- FAO y Universidad Nacional de Mexico. (2004). WISDOM Program.
Karampinis E., Kougioumtzis M.A., Gavidou V., Grammelis P. (2019). *Cadenas de valor de biomasa de poda agrícola y renovación de plantaciones*. 44 páginas.

- The Carbon Basis Company Ltd. Instituto Tecnológico de El Salto. The Pembina Institute ISOGIS Corp. (2010). *Evaluación de la Madera, la Biomasa y el Carbono de Bosques y las Tecnologías Potenciales de Producción de Energía a Partir de Biomasa en Durango, México*. 113 páginas.
- Tripaldi, G., Valdés, P. y C. Bofill (2017). *Plan de Ordenamiento Territorial Santa Rosa – Corrientes. Plan de Ordenamiento Santa Rosa – Fase Cero/Fase Propositiva. Documento Final*. Subsecretaría de Planificación Territorial de la Inversión Pública de la Nación. 167 páginas.
- Unidad para el Cambio Rural (2014). *Argentina: Plantaciones Forestales y Gestión Sostenible*. Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Nación. 15 páginas.
- U.S. Environmental Protection Agency (2017). *A Voided Emissions and geneRation Tool. (AVERT) (2017). User Manual Version 1.5. March 2017. 83 páginas.*

Estimación del potencial de biogás a partir de tambos en la provincia de Entre Ríos con destino al autoconsumo

Cruañez M. J.^{1*} y Barlatey M. A.²

¹Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos, Ruta Provincial 11, Km. 10.5, 3101 Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.

²Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 3260 Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina.

*Autora para correspondencia: josefinacruañez@gmail.com

La biomasa es una de las fuentes de energía renovable más confiables, es constante y se puede almacenar, lo que facilita la generación de energía térmica y eléctrica. En virtud de sus extraordinarias condiciones agroecológicas, y las ventajas comparativas y competitivas de su sector agroindustrial, la Argentina es un gran productor de biomasa con potencial energético.

La fracción orgánica de la biomasa húmeda se transforma a partir de un proceso natural de descomposición biológica, en presencia (aeróbica) o en ausencia (anaeróbica) de oxígeno. A partir de este último proceso se puede obtener bioenergía, mediante la utilización del metano (CH₄) producido.

A los efectos del presente trabajo se adoptó como valor de referencia la producción de residuos de 3 kg/día/animal, que puede ser recolectado cuando la vaca se encuentra en el proceso de ordeño. El valor de referencia adoptado anual fue de 1 095 kg de estiércol fresco/año/animal. El desecho orgánico es el combustible que genera el gas que luego es utilizado por los quemadores que permiten calentar el agua que es utilizada en el proceso de pasteurización de la leche, con la que se elaboran los quesos”.

Se ha concluido que el aprovechamiento de este potencial no sólo reemplaza la energía derivada de fuentes fósiles por fuentes renovables, sino que también favorece una gestión adecuada de los residuos, evitando un pasivo ambiental.

1. Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar la estructura de los tambos/lechería del Departamentos Paraná, Nogoyá y Diamante de la Provincia de Entre Ríos, estimar

la producción de biogás a nivel departamental y la viabilidad técnica del suministro de energía eléctrica mediante biodigestores para el consumo del sistema tambo/quesería y viviendas de los productores.

Analizar el potencial de producción de biogás de la Provincia de Entre Ríos a partir de los residuos de los tambos de ganado vacuno. Caracterizar las propiedades caloríficas del biogás producido a partir del estiércol de ganado vacuno y la producción anual por cabeza de ganado.

Evaluar las características de los productores tambo/quesería de la Provincia de Entre Ríos.

2. Introducción

En 2015, la República Argentina promulgó la Ley 27191 –que modificó la Ley 26190–, con el objetivo de fomentar la participación de las fuentes renovables hasta que alcancen un 20% del consumo de energía eléctrica nacional en 2025, otorgando a la biomasa una gran relevancia.

La biomasa es una de las fuentes de energía renovable más confiables, es constante y se puede almacenar, lo que facilita la generación de energía térmica y eléctrica. En virtud de sus extraordinarias condiciones agroecológicas, y las ventajas comparativas y competitivas de su sector agroindustrial, la Argentina es un gran productor de biomasa con potencial energético.

La energía derivada de biomasa respeta y protege el ambiente, genera nuevos puestos de trabajo, integra comunidades energéticamente vulnerables, reduce la emisión de gases de efecto invernadero, convierte residuos en recursos, ahorra dinero en combustibles fósiles, moviliza inversiones y promueve el agregado de valor y nuevos negocios.

La fracción orgánica de la biomasa húmeda se transforma a partir de un proceso natural de descomposición biológica, en presencia (aeróbica) o en ausencia (anaeróbica) de oxígeno. A partir de este último proceso se puede obtener bioenergía, mediante la utilización del metano (CH_4) producido.

La digestión anaeróbica es un proceso biológico que puede ser utilizado como un sistema de recuperación de energía y nutrientes contenidos en la materia orgánica. En él interviene un grupo de microorganismos que transforman la materia orgánica en una mezcla de gases (fundamentalmente CH_4 y dióxido de carbono, CO_2) conocida como biogás y en un efluente denominado digerido, que contiene macro y micronutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio y calcio, entre otros).

El valor energético del biogás depende principalmente del contenido de CH_4 , que varía entre 50 y 75%. El biol obtenido puede utilizarse como mejorador del suelo, ya que presenta excelentes características agronómicas, lo que permite el aumento de la fertilidad química de los suelos y, por lo tanto, la sustitución de algunos agroquímicos de origen sintético (FAO, 2016). El proceso de digestión anaeróbica se realiza en contenedores herméticamente cerrados, denominados reactores, biodigestores o fermentadores.

La digestión anaeróbica es un proceso que puede ocurrir en residuos ganaderos y agrícolas, así como en los provenientes de las industrias de transformación de productos agropecuarios. Por su diseño y funcionamiento, los biodigestores permiten la codigestión

con otras materias primas, como los recursos biomásicos provenientes de cultivos bioenergéticos, lo que garantiza el suministro de combustible a la planta de generación. Este tratamiento permite aprovechar la complementariedad de las composiciones de los distintos sustratos con el fin de lograr perfiles de procesos eficientes.

FAO (2019) realizó un Relevamiento de plantas de biodigestión anaeróbica con aprovechamiento energético térmico y eléctrico en la República Argentina, donde caracterizaron el sistema nacional, discriminado por provincia, por generadores privados y oficiales, y sus distintas escalas, origen del insumo y su destino.

La implementación de la biodigestión anaeróbica surge como alternativa a la disposición inadecuada de los efluentes de actividades pecuarias, ya que un manejo inadecuado de los mismos puede producir contaminación del suelo, del aire y de los cuerpos de agua. Durante el proceso de descomposición de estos residuos se liberan CH_4 y CO_2 a la atmósfera, y el vertido de los efluentes a los cuerpos de agua produce contaminación por su alta carga orgánica. Los microorganismos que participan en el proceso de descomposición de la materia orgánica utilizan el oxígeno (O_2) disuelto afectando al resto del ecosistema acuático.

Asimismo, por la composición química que suele tener este tipo de sustratos (alto contenido de sales minerales y en especial de nitrógeno), al degradarse la materia orgánica se forman compuestos volátiles como CH_4 y CO_2 , lo que produce altas concentraciones de nitrógeno en el agua y genera una elevada proliferación de algas, favoreciendo la eutrofización.

Los tambos quesería tienen una superficie promedio de 60 hectáreas, Mingo, G. *et al* (2010), su conformación es de pequeños o medianos productores y acompañan su trabajo con tareas agrícolas a través de la suplementación de heno y grano que sirve para la cría del propio ganado. Acorde a la estructura económica, la mano de obra empleada tanto en el tambo chico como en el tambo quesería es solamente familiar.

La generación de energía a través de la gestión apropiada de la biomasa húmeda tiene innumerables beneficios ambientales, económicos y sociales:

- Uso de energía renovable.
- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2 y CH_4).
- Reducción de la contaminación de cuerpos de agua y de la proliferación de vectores de enfermedades; mejora de las condiciones higiénico-sanitarias de la zona.
- Independencia en el abastecimiento de energía reemplazando total o parcialmente a los combustibles fósiles.
- Fomento del desarrollo regional mediante nuevas actividades y técnicas agropecuarias.
- Aprovechamiento de los subproductos derivados de la producción agroalimentaria.

Por otra parte se producen beneficios económicos para productores locales e inversores, entre los que merecen destacarse:

- Contribución al arraigo de las poblaciones rurales al promover nuevas actividades económicas.
- Generación de infraestructuras y servicios para satisfacer las necesidades básicas de los productores y habitantes.
- Especialización de la mano de obra.
- Mejora de la sustentabilidad de los sistemas productivos.

3. Metodología

La metodología desarrollada en el presente trabajo fue:

- Determinar y caracterizar los tambos quesería en los departamentos Paraná, Nogoyá y Diamante de la Provincia de Entre Ríos, Argentina
- Evaluar, a partir de información secundaria, los requerimientos de potencia y de consumo eléctrico de un tambo quesería.
- Determinar a nivel departamental la posibilidad de la utilización del biogás como fuente energética renovable para el autoconsumo.

4. Resultados

Para el caso de las producciones ganaderas, las estimaciones se llevaron a cabo a partir de datos del SENASA de octubre del 2015. La misma fue facilitada con la localización de cada establecimiento y número de cabezas. En base a estos datos se realizaron los cálculos de la oferta para la producción de tambos. Para estimar los residuos generados por cabeza y por tipo de producción se utilizó el criterio aplicado por Flores Marco *et al.* (2009).

Bragachini *et al.* (2018) analizaron bioenergía distribuida para el agregado de valor a la producción, como son los residuos pecuarios: estiércoles y residuos sólidos de producciones porcinas, aviares, bovinas, y los productos de la actividad tambo/quesería.

Para los establecimientos tamberos se contemplaron 3 kg/día/animal, ya que sólo se considera la cantidad de residuo que puede ser recolectado cuando la vaca se encuentra en el proceso de ordeño.

Los valores estimados del biogás producido a partir de los tambos de la Provincia de Entre Ríos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Estimación del potencial de generación de biogás para tambos.

Variable energética	Valor
Biogás (m ³ /kg estiércol fresco)	0,0315
Biogás (m ³ /animal/año)	34,49
Energía (kcal/animal/año)	189,709
Energía (tep/animal/año)	0,0190

Fuente: Adaptado por Butti, M en base a Flores Marco *et al.* (2009) y Hilbert (2008).

Los principales productos del proceso de digestión anaerobia, en sistemas con alta carga orgánica y en mezcla completa son el biogás y un Bioabono que consiste en un efluente ya estabilizado.

- Biogás. es una mezcla gaseosa formada principalmente de metano y dióxido de carbono, pero también contiene diversas impurezas. La composición del biogás

depende del material digerido y del funcionamiento del proceso. Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45% es inflamable.

- b. Bioabono. Las características del Bioabono, dependen en gran medida del tipo de tecnología y de las materias primas utilizadas para la digestión. Durante el proceso anaeróbico, parte de la materia orgánica se transforma.

El consumo de kWh por litro de leche producido y/o por vaca define la eficiencia energética eléctrica de un tambo. Ambos índices siempre deben referenciarse a un periodo de tiempo (meses o año) para evitar sub o sobre estimaciones puntuales. Los diagnósticos realizados por Pressman, A., 2010; Morin, C., 2011; Loobuyck, *et al.*, 2012; Dairy Australia, 2013; Edens, *et al.*, 2013; Oleggini, 2016), permiten establecer la importancia relativa de cada sector respecto al consumo total de electricidad del tambo, ver Tabla 2.

Tabla 2. Requerimientos energéticos pos sector del tambo.

Sector del tambo	%
Equipo de refrigeración de leche.	40 al 50
Equipos para el calentamiento de agua	22 al 26
Equipo de leche, de ordeño, bombas de vacío e impulso.	15 al 20
Otros consumos (bomba de agua, iluminación, bomba de lavado, bomba de efluentes, ventiladores, consumo doméstico).	20 al 25

Muchos de los diagnósticos realizados muestran una alta variabilidad de estos índices entre tambos: 160-920 kWh por vaca o de 30-120 kWh por cada 1000 litros de leche (Morison *et al.*, (2007); Oleggini, 2016), Innovation Center for US Dairy, 2016; European Dairy nergy Website, (2016). La amplitud de estos rangos demuestra y abre claramente posibilidades concretas de trabajo y mejoras. Los valores propuestos por Oleggini *et al.*, (2015) en la Tabla 3 se presenta una categorización de los tambos según el consumo eléctrico expresado en kWh/1000 litros leche. El consumo de Energía Eléctrica por 1000 Litros de Leche Producida informado Flores *et al.* (2015) es 13.6 kWh.

Tabla 3. Valores de referencia de consumo.

Clasificación de los tambos (kWh/1000 litros leche)				
Muy Económico	Económico	Medio	Elevado	Muy elevado
< 20	20-29	30-39	40-60	>60

La eficiencia en el uso de la energía eléctrica kWh/1000 litros de leche producidos para el mes de Enero de 2020 106,76 kWh mientras que en Mayo el mismo año se redujo a 70,35 kWh, con una estrecha relación con las condiciones ambientales de temperatura. Otro aspecto a considerarse es que el agua destinada a la producción se extrae de un acuífero con perforaciones del orden de 90 metros promedio, y niveles estáticos de 60 metros

Estimación del potencial de biogás a partir de tambos en la provincia de Entre Ríos con destino al autoconsumo

Cruañez y Barlatey

bajo boca de pozo. El clima en la provincia de Entre Ríos es templado y las temperaturas van aumentando a medida que se viaja del sur al norte. Por eso se puede reconocer dos regiones climáticas definidas. Al sur de la provincia la temperatura es templada con estaciones bien marcadas. Invierno frescos y veranos cálidos. Las lluvias son regulares durante todo el año. En el norte de Entre Ríos el clima es cálido con el invierno suave y el verano muy caluroso, Tabla 4.

Tabla 4. Características climáticas de Paraná. Entre Ríos.

Verano	Otoño	Invierno	Primavera
Tiempo muy caluroso a mediodía y en las primeras horas de la tarde; mañanas y tardes agradables; noches agradables a frescas	Tiempo agradable durante el día, noches frescas a frías	Días frescos, noches frías	Tiempo agradable durante el día, noches frescas.

Del análisis conjunto de la producción de la producción de energía en calorías y la demanda eléctrica en kW/hora, surge que el sistema es sustentable para una relación de 25.54 kW/h cada 1000 litros de leche, lo que es consistente con lo expresado en la Tabla 3.

Finalmente, el valor de referencia adoptado anual fue de 1 095 kg de estiércol fresco/año/animal. En Tabla 5 se presentan los valores estimados para los tambos de la Provincia expresada en tonelada equivalente de petróleo (tep) se adoptó un equivalente de 107 kcal por cada tep. Como se observa en la Figura 1, Los tambos se concentran en su mayoría en la costa del Río Paraná, en los departamentos Paraná, Nogoyá y Diamante, que totalizan 47,2 tep/año, sobre un total provincial de 79,4 tep/año.

Tabla 5. Potencial del biogás de los tambos de la Provincia de Entre Ríos.

Departamento	Biogás (tep/año)
Colón	4,6
Diamante	7,0
Gualeduay	2,7
Gualeduaychú	7,8
La Paz	4,8
Nogoyá	17,9
Paraná	22,3
San Salvador	0,1
Tala	3,8
Uruguay	0,8
Victoria	0,2
Villaguay	0,1
Total Provincial	79,4

Los principales productos del proceso de digestión anaerobia, en sistemas con alta carga orgánica y en mezcla completa son el biogás y un Bioabono que consiste en un efluente ya estabilizado. La Tabla 6 presenta las características del biogás producido por el proceso de transformación, durante el proceso anaeróbico, parte de la materia orgánica se transforma en metano.

Tabla 6. Características generales del biogás.

Composición	55-70% Metano (CH ₄) 30-45% Dióxido de carbono (CO ₂)
Contenido energético	6.0 - 6.5 KW.h.m ³
Trazas de otros gases Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo. m ³ de biogás. (Hidrógeno, Nitrógeno, Monóxido de carbono, Oxígeno, Ácido Sulfhídrico)
Límite de explosión	6-12% de biogás en el aire.
Temperatura de ignición	650 – 750 °C
Presión crítica	74 – 88 atm.
Temperatura crítica	-82.5 °C
Densidad normal	1.2 kg.m ³
Olor	El olor es sulfurado, como el de huevo podrido. Mientras más concentración de Azufre mayor percepción de este olor. El biogás desulfurado tiene un olor casi imperceptible.
Masa molar	16.0243 Kg. Kmol ⁻¹

El desecho orgánico de una tambo/quesería es el combustible que genera el gas que luego es utilizado por los quemadores que permiten calentar el agua que es utilizada en el proceso de pasteurización de la leche, con la que se elaboran los quesos”. No solo significa un gran ahorro para el emprendimiento en cuanto a costos de energía, sino también constituye una solución para la disposición final del estiércol, un tema muy importante en los tambos/queserías. La Figura 2 presenta un croquis de un equipo de Biodigestión desarrollado por el INTI.

Estimación del potencial de biogás a partir de tambos en la provincia de Entre Ríos con destino al autoconsumo
Cruañez y Barlatey

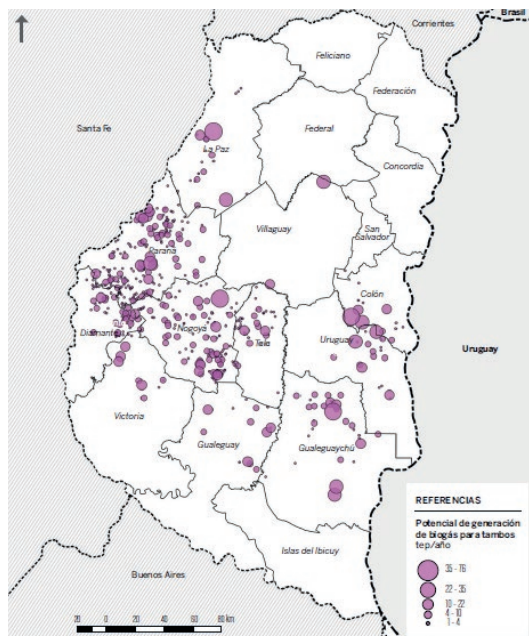


Figura 1. Distribución a nivel de sección departamental del potencial de generación de biogás por tambos. ENERSA (2009).

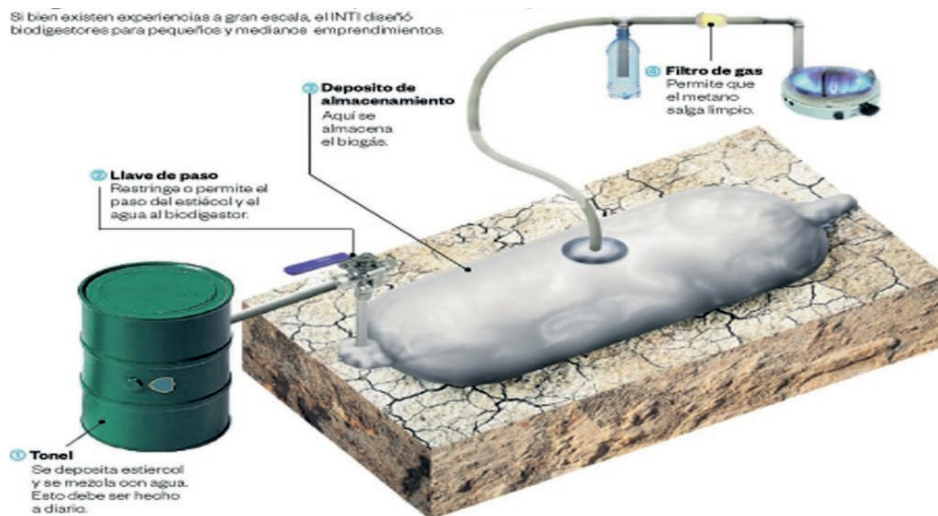


Figura 2. Esquema básico de un equipo de biodigestión de un tambo/quesería.

Fuente: INTI Salta.

Debe destacarse en Argentina el establecimiento de la empresa AdecoAgro localizado en Christophersen, Provincia de Santa Fe, consta, cuenta con 7 mil vacas que producen alrededor de 37 litros por vaca por día, lo que representa un total diario de 250 mil litros diarios de leche. Consta de tres tanques de 3.500 metros cúbicos de capacidad cada uno, donde 2.500 metros cúbicos son para retener gas, en un proceso de doble etapa. Es decir: hay dos fermentadores primarios que producen el 80 % del biogás y un fermentador secundario que produce el 20 % restante. Vale aclarar en este sentido que el biogás es un gas compuesto 50/55 por ciento de metano y 40/45 por ciento de dióxido de carbono, ver Figura 3.



Figura 3. Vista aérea del complejo de Adecoagro. Cristophersen. Provincia de Santa Fe.

Fuente: Campolitoral.

5. Conclusiones

El aprovechamiento de este potencial no sólo reemplaza la energía derivada de fuentes fósiles por fuentes renovables, sino que también favorece una gestión adecuada de los residuos, evitando un pasivo ambiental y produciendo un efluente del proceso productivo de la cadena láctea estabilizada.

Así, el presente trabajo constituye la línea de base para la formulación de proyectos bioenergéticas de diferentes escalas, con la posibilidad de producir diversos vectores energéticos (biogás, electricidad, calor) de manera sustentable.

Finalmente, el sistema es sustentable para una producción de biogás equivalente al menos 25,36 kW/hora cada 1000 animales.

6. Referencias

- Bragachini, M., Saavedra, A., Méndez, J.M., Mathier, D., Bragachini, M., Sosa, N. (2018). *Ciencia e investigación* - Tomo 68 N° 2 – 2018.
- Dairy Australia. (2013). *Saving energy on dairy farms*. Dairy Australia Limited. ISBN. 978-0-9871000-5-4, 24 pag.
- Edens, W.C., Pordesimo, L.O., Wilhelm, L.R., & Burns, R.T. (2013). Energy use analysis of major milking center components at a dairy experiment station. *Applied Eng. In Agriculture*, 19(6), 711- 716. <https://doi.org/10.13031/2013.15659>
- ENERSA (2009). *Estudio de Prefactibilidad de generación de energía eléctrica utilizando biomasa*. Estudio 1.EE.273. 38 páginas.
- FAO. (2016). *Análisis espacial del balance energético derivado de biomasa*. Metodología WISDOM. Provincia de La Pampa. Buenos Aires. Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG) – FAO. Disponible en <http://www.fao.org/3/ca2284es/CA2284ES.pdf>
- FAO (2019). *Relevamiento Nacional de Biodigestores. Relevamiento de plantas de biodigestión anaeróbica con aprovechamiento energético térmico y eléctrico*. Colección Documentos Técnicos N° 6. Buenos Aires. 84 pp. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Flores Marco, N., J. Hilbert, S. Carballo y A. Anschau. (2009). Potencial de producción de biogás en la provincia de Santa Fe. Instituto de Ingeniería Rural. Buenos Aires. INTA Castelar.
- Flores, R. V. (2015). *Diagnóstico y Caracterización Energética del Sector Lechería en la Región de Los Ríos*. Estudios y documentos de trabajo N° 6. Instituto de Desarrollo Agropecuario, Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile 146 páginas. Chile.
- Innovation Center for US Dairy, (2016), European Dairy nergy Website.
- INTI (2020). <https://ruralnet.com.ar/exitosa-incorporacion-biogás-tambo-salteno/> visita 26 de junio de 2020.
- Mingo, G., Fontanetto, I. Laura, De Isasi, M. Cristina, Facendini, M. Rosa, Orsini, Germán, Werner, M. (2010). Características y estrategias de los tamberos-queseros de la Colonia San Martín (Entre Ríos, Argentina). *Ciencia, Docencia y Tecnología*, vol. XXI, núm. 41, noviembre, 2010, pp. 31-48. Universidad Nacional de Entre Ríos Concepción del Uruguay, Argentina
- Loobuyck M., Willame C., Bazantay F., Corbet, V. (2012). Economies 1d'énergie dans le refroidissement du lait á la ferme. *Revue Generale du Froid et du conditionnement d'air*. Avril 2012, pag 39-44.
- Morison, K., Gregory, W., Mackenzie, D. Caldwell, S. (2007). *Improving Dairy Shed Energy Efficiency*. In: www.cowshed.org.nz. 28 pag. ISBN: 978-0-908993-43-7.
- Oleggini, G., Arismendi, F., Darsch P. (2015). *Proyecto Tambo y Energía. Eficiencia Energética y Energías Renovables*. In: www.energia.eleche.com.uy. 8 pag.
- Oleggini, G., Arismendi, F., Darsch P. (2016). *Proyecto Tambo y Energía. Eficiencia Energética y Energías Renovables*. 2015. In: www.energia.eleche.com.uy. 8 pag.
- Pressman, A. (2010). *Dairy Farm Energy Efficiency*. NCAT. Agriculture National Sustainable Agriculture Information Service, 1-800-346-9140. www.attra.ncat.org. 16 pag.

- Taverna, M., Ruata, R. y K. García (2016). *Alternativas para reducir el consumo de energía eléctrica en tambos*. Unidad editoria/Agencia INTA 2016. 34 páginas.
- Taverna M., Callaci C., Costamagna D., García K., Smulovitz A., Millapan L. (2020). *Sistema de Ordeño Voluntario - Tambo Robot*. INTA Rafaela. 6 páginas. (UBA).

Microalgas y sus potenciales aplicaciones en Biorrefinerías

Xavier Álvarez Montero^{1*}, Ingrid Mercado Reyes² y José Carbo Pincay²

¹Universidad Estatal de Bolívar (UEB), Av. Ernesto Che Guevara y Gabriel Secaira, Guaranda-Ecuador.

²Laboratorio de Biotecnología Microbiana (LabBiotem S.A.), Ceibos Calle 17 y transversa, Guayaquil-Ecuador.

*Autor para correspondencia: xalvarez@ueb.edu.ec

1. Introducción

En las últimas décadas, las tecnologías ómicas sobre microalgas han sido uno de los campos con mayor desarrollo de las ciencias biológicas, para numerosas aplicaciones ambientales, biológicas, biomédicas e industriales. Las microalgas son formas de vida fotosintéticas simples, y poseen un extraordinario potencial de crecimiento en condiciones ambientales adversas. Las microalgas tienen un enorme potencial para la asimilación de varios nutrientes del agua y del dióxido de carbono del aire. Estos microorganismos tienen un gran potencial y se necesita urgentemente el estudio de su fisiología, metabolismo, y genómica para la gestión sostenible y renovable de alimentos, piensos y biocombustibles. La biomasa de microalgas se puede utilizar para alimentación, biorremediación, biocombustibles y una serie de productos químicos. Las microalgas tienen la capacidad de biosintetizar polímeros, toxinas, ácidos grasos y enzimas, que pueden ser útiles para desarrollos farmacéuticos, nutracéuticos y cosmeceúticos. El presente capítulo, trata de los rasgos estructurales, metabólicos de las microalgas, y sus principales aplicaciones. Posteriormente se aborda los grandes esfuerzos a nivel mundial para investigar varias fuentes de energía renovable que podrían reemplazar a los combustibles fósiles. Los biocombustibles se suponen alternativas promisorias a los combustibles fósiles convencionales, porque tienen el potencial de eliminar la mayoría de los problemas ambientales que producen los combustibles fósiles. Sin embargo, la producción sostenible de biocombustibles es centro de un acalorado debate, porque se percibe que los biocombustibles producidos a partir de cultivos, residuos celulósicos, y

fuentes de alimentos, enfrentan varias limitaciones para lograr el desarrollo sostenible en la confluencia de la producción de biocombustibles, la mitigación del cambio climático y el crecimiento económico. En vista del proceso de producción de biocombustibles aún en desarrollo, la producción de biodiesel a partir de microalgas ofrece un mayor potencial para convertirse en una fuente de energía inagotable y renovable.

2. Descripción de los microorganismos

Las microalgas son organismos que pueden presentar una organización procariota (cianobacterias), o eucariota (clorofitas, euglenofitas, dinofitas, criptofitas, etc.) (Fig. 1), con gran capacidad fotosintética y altas tasas de crecimiento. Sin embargo, las cianobacterias no son estrictamente microalgas, ya que son bacterias Gram negativas, y en términos generales las microalgas son eucariotas unicelulares o pluricelulares, pero debido a su gran importancia económica se las ubica en este contexto (Sheath, 1997; Chapman, 2013). Son organismos pertenecientes al reino Protista, unicelulares o pluricelulares, con el proceso metabólico de la fotosíntesis oxigénica, para obtener moléculas de carbono orgánico a partir de la energía luminosa proveniente del sol y del CO₂, su metabolismo celular no es capaz de formar tejidos por lo que no poseen raíces, tallos ni hojas, característica que las diferencian de las plantas vasculares (Carmona, Hernández & Ramírez, 2004; Lee, 2008).

La estructura celular de las microalgas procariotas carece de membranas que rodeen organelos (plástidos, mitocondrias, núcleo, aparato de Golgi) además, carecen de flagelos. Las microalgas eucariotas por el contrario su estructura celular consta de organelos: plástidos, mitocondrias, núcleo, aparato de Golgi. Ambos tipos de organización celular presentan una pared celular que rodea la célula, esta está compuesta principalmente por polisacáridos, en la pared celular de estos microorganismos se observan numerosos tipos de estas biomoléculas (Lee, 2008).

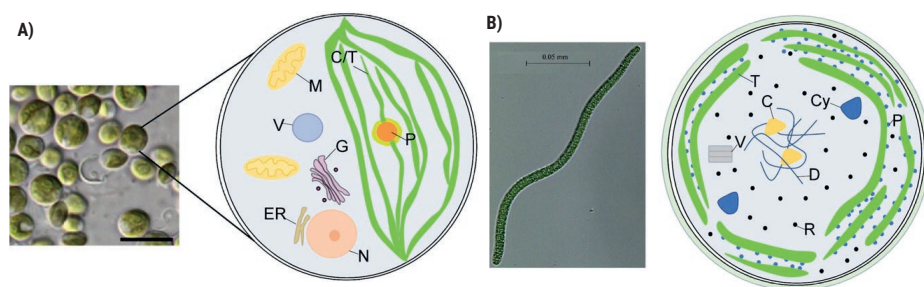


Figura 1. Micrografía de la microalga eucariota unicelular *Chlorella vulgaris* (escala de la barra 10 mm).

- A) El esquema ultra-estructural celular incluye el cloroplasto con los tilacoides (C/T), pirenoides (P), núcleo (N), vacuola (V), retículo endoplasmático (ER), aparato de Golgi (G), y mitocondria (M).
Micrografía de la microalga procariota multicelular *Arthrospira platensis*.
- B) El esquema ultra-estructural celular incluye el tilacoide (T), cianoficina (Cy), carboxisomas (C), ADN (D), ribosomas (R), ficobilisoma (P), y vacuola (V) (Adaptado de Grossmann, Hinrichs & Weiss, 2019).

3. Distribución y características metabólicas

Las microalgas están presentes en todos los ecosistemas de la Tierra, tanto en ecosistemas acuáticos como terrestres, inclusive aquellos ambientes extremos en donde se conocen a estos microorganismos como extremófilos, representan una gran variedad de especies que habitan en una amplia variedad de condiciones medioambientales, generalmente son de vida libre, pero un número de especies viven en asociaciones simbióticas con una variedad de organismos; se estima que existen más de 50000 especies, pero aproximadamente 30000 especies han sido estudiadas y analizadas (Richmond, 2004). A pesar de la abundancia de especies presentes tanto en océanos como masas de agua dulce, solo se ha estudiado el 60% de su diversidad (Falkowski *et al.*, 2004; Richmond, 2004; Massana, Terrado, Forn, Lovejoy & Pedros-Alió, 2006; Band, 2007).

Una característica fundamental de las microalgas tanto las que presentan la estructura procariota como las que tienen la estructura eucariota, es que su principal proceso metabólico es la fotosíntesis, sin embargo, hay cepas que pueden pasar al metabolismo heterotrófico o mixotrófico. La fotosíntesis es el único proceso metabólico de conversión de la energía lumínica del sol, en este proceso compuestos inorgánicos y la energía lumínica visible (*PAR-Photosynthetically Active Radiation*) de 700-400 nm de longitud, son convertidos a materia orgánica por organismos autótrofos como las microalgas. Solo existen dos pigmentos fotosintéticos primarios principales, la clorofila (Chl) y la bacterioclorofila (BChl) (Scheer, 1991). Existen así mismo ocho sistemas principales de captación de luz (Larkum, 2006). Los sistemas fotosintéticos de las cianobacterias, los protistas fotosintéticos, y las plantas terrestres se construyen alrededor de la clorofila-*a* (Chl-*a*), sin embargo, con los últimos estudios se conoce que la clorofila-*d* (Chl-*d*) se puede considerar como un pigmento fundamental (Schliep *et al.* 2013). Las microalgas procariotas (cianobacterias) hace 3 mil millones de años mediante este proceso metabólico crearon el inicio de la atmósfera oxigénica de la Tierra (Masojídek, Koblížek & Torzillo, 2013).

Las microalgas forman parte del primer nivel de producción primaria, componen un porcentaje significativo de las comunidades bentónicas y planctónicas, siendo responsables de la liberación de oxígeno mediante la fotosíntesis y de aproximadamente el 45% de la producción primaria neta global mediante la elaboración de materia orgánica (Falkowski, 1994; Field, Behrenfeld Randerson & Falkowski, 1998; Suthers & Rissik, 2009; Rouco, 2011).

4. Desarrollo biotecnológico

El siglo pasado fue el inicio de las colecciones de microalgas por investigadores en diferentes países. Un ejemplo es la colección de microalgas dulceacuáticas de la Universidad de Coimbra (Portugal), considerada como una de las más grandes en el mundo, con más de 4000 cepas y 1000 especies; esta colección es un ejemplo de la gran diversidad de microalgas que pueden ser seleccionadas para un amplio rango de aplicaciones biotecnológicas, desde productos farmacéuticos, nutracéuticos, dermocosméticos, alimenticios, y para la incipiente industria de la bioenergía (Mata, Martins & Caetano, 2010).

Los primeros estudios de microalgas en condiciones de laboratorio datan de 1910s, cuando el microbiólogo Beijerinck aisló y cultivó *Chlorella vulgaris*; en 1919 Warburg Otto ahondó en el cultivo de *Chlorella* como base para el análisis de los procesos fotosintéticos. Durante la II Guerra Mundial, en Alemania, se efectuó por primera vez la producción de cultivos masivos enfocados en la obtención de lípidos empleando la microalga *Chlorella pyrenoidosa* y la diatomea *Nitzschia palea*. A raíz de esto, surgió la idea del uso de biomasa microalgal como sustituto de proteínas de origen animal o vegetal, e incluso como posibles suplementos alimenticios (Bewicke & Potter, 1985; Warburg, 1919; Nickelsen, 2007; Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

Para 1950, Soeder y su grupo de trabajo ya planteaban los primeros esbozos del uso del CO₂ industrial como parte de los requerimientos nutricionales en el cultivo de *Scenedesmus acutus*; mientras que Oswald y sus colaboradores sugirieron el uso de cepas microalgales para el tratamiento de aguas residuales con la remoción de nutrientes y la producción de biomasa con cantidades significativas de proteína. En 1960 Oswald y Golueke analizaban las bases para sistemas de producción de metano haciendo uso del metabolismo de microalgas en la biotransformación de la energía solar (Oswald & Golueke, 1960; Soeder & Pabst, 1975; Oswald, 1988; Soeder & Hegewald, 1989).

La década de los 80 marcó el inicio de grandes industrias con base principalmente en producción masiva de *Arthrospira (Spirulina)* y *Dunaliella* para la obtención de compuestos activos como pigmentos, proteínas, carbohidratos y la mejora en el rendimiento de los cultivos. Actualmente la producción a escala de cultivo de biomasa microalgal tiene un amplio mercado con alta demanda (Soeder & Pabst, 1975; Gómez, 1977; Day, Benson & Fleck, 1999; Cohen, 1986; Becker, 1988; Borowitzka, 1988; Soeder & Hegewald, 1989; Gómez, 2007; Nickelsen, 2007; Brennan & Owende, 2010; Das, Aziz & Obbard, 2011; Coêlho et al., 2019).

Estos microorganismos tienen la capacidad de fijar el CO₂ por lo que son conocidos como fábricas celulares que emplean la energía solar para convertir el CO₂ en compuestos bioactivos de alto valor agregado con múltiples aplicaciones, como proteínas (lectinas, ficobiliproteínas), aminoácidos, carbohidratos (exopolisacáridos, ácidos orgánicos, biopolímeros), lípidos (ácidos grasos, esteroides, PUFAs), pigmentos (carotenoides, clorofila), alcaloides, compuestos halogenados, policétidos, ficotoxinas, agar agar, carragenina, biodiesel, vitaminas, entre otros (Richmond, 1990; Paniagua-Michel & Sasson, 1995; Gavrilescu & Chisti, 2005; Plaza, Herrero, Cifuentes & Ibanez, 2009; Hernández-Pérez & Labbé, 2014). Estos componentes bioactivos acumulados en la biomasa o secretados de forma extracelular pueden poseer más de una actividad biológica: antimicrobianos, anticancerígenos, antioxidantes, antienzimáticas, antiinflamatorias, hipotensoras, antiobesidad, entre muchas otras (Carballo- Cárdenas, Tuan, Janssen & Wijffels, 2003; Del-Campo, García-González & Guerrero, 2007; Smee et al., 2008; Ibañez & Cifuentes, 2013; De Morais, Vaz, Morais & Costa, 2015).

Debido a la variedad de metabolitos que producen estos microorganismos, tienen gran importancia dentro de industrias como la farmacéutica, nutracéutica, biomedicina, dermocosmética, alimenticia, agricultura, energía renovable, entre otras., situación que ha motivado la búsqueda y estudio de nuevos metabolitos microalgales (Meeting, 1996; Li, Du & Liu, 2008).

El cultivo comercial de microalgas tiene actualmente cerca de 50 años, grandes países asiáticos como India, China y Taiwán son los líderes en producción comercial de microalgas, con un aproximado de 5000 t año⁻¹ de biomasa seca (Fig. 2), sin embargo, la biotecnología de microalgas empezó a desarrollarse recién a mediados del siglo XX, actualmente solo el 10% de los géneros de microalgas estudiados se emplea para fines comerciales (Lee, 1997; Borowitzka, 1999; Spolaore, Joannis, Duran & Isambert, 2006; Raja, Ferrer & Shearer, 2009). Entre los géneros con importancia comercial se incluyen a *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Haematococcus*, *Tetraselmis*, *Dunaliella*, *Botryococcus*, *Isochrysis*, *Nannochloris*, *Schizochytrium*.

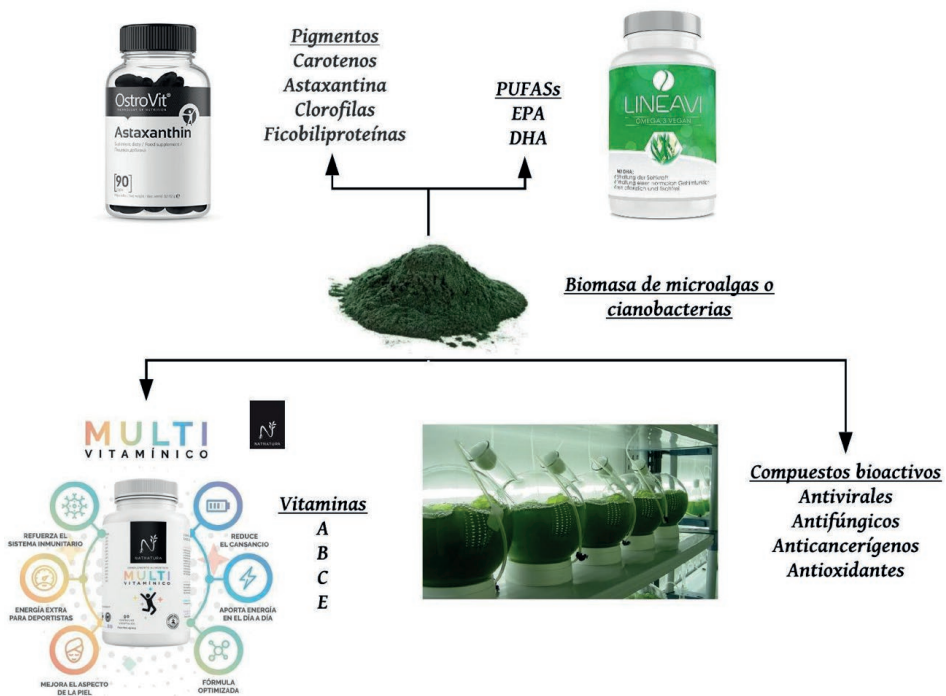


Figura 2. Compuestos bioactivos de microalgas (Adaptado de Priyadarshani & Rath, 2012).

El cultivo de estos microorganismos con fines bioenergéticos está tomando una enorme importancia debido a su alto contenido de lípidos y de carbohidratos, de entre 30-40% aproximadamente en biomasa seca para ambos compuestos, además, de una alta eficiencia fotosintética (superior a la de las plantas), uso de tierras no aptas para la agricultura, y que hay muchas especies de aguas marina y estuarinas que no utilizarían agua dulce (Miao & Wu, 2006).

Se presentan ventajas y desventajas en el cultivo masivo de microalgas y cianobacterias, siendo más numerosas las primeras (Tabla 1).

Tabla 1. Ventajas y desventajas del cultivo masivo de microalgas y cianobacterias.

Ventajas	Desventajas
a. Alta eficiencia biológica. Eficiencia fotosintética 4 veces mayor a las plantas (Santos, Rossi & Valdez, 2016).	a. Demanda alta de energía en el procesamiento de la biomasa después de la cosecha, en la extracción de lípidos y en la transformación de estos (Hernández-Pérez & Labbé, 2014).
b. Rápido crecimiento, elevada capacidad de generación de biomasa (Fernández, 2014).	b. Necesidad de una fuente de CO ₂ puro sin contaminantes de ningún tipo.
c. Son un recurso inagotable, con alta productividad.	c. Producción rentable solo a partir de un precio elevado en el producto.
d. Pocos requerimientos para su cultivo, luz solar, bajo consumo de nutrientes, agua.	d. Puede agotar recursos no renovables, como el fósforo.
e. Obtención de una gran variedad de productos de alto valor agregado (Milledge, 2011).	
f. No requieren de terrenos agrícolas para su cultivo por lo que no compiten con actividades agrarias.	
g. No requiere de agroquímicos ni pesticidas.	
h. Cultivo continuo en cualquier época del año.	
i. Captura del CO ₂ atmosférico, 1.8 kg de CO ₂ kg ⁻¹ de biomasa seca (Chisti, 2007; Martínez, 2009).	
j. Capacidad ficorremediadora.	
k. Crecen en diversidad de masas de agua debido a su gran adaptación, minimizando el consumo de agua dulce (Santos, González & Martín, 2014).	

5. Energías renovables

Las energías renovables son una de las fuentes más importantes para suplir el consumo energético, esperando de esta manera satisfacer la demanda mundial de energía logrando aumentar un 12.4% para el 2023. Además, se cree que las energías renovables alcanzarán un mayor crecimiento en el sector eléctrico, abasteciendo aproximadamente el 30% de la demanda de energía en el 2023 (Pastén, 2012; Bueno, Rodríguez & Rodríguez, 2016).

Tanto las fuentes de energía no renovables, como las renovables causan impactos ambientales, sin embargo, las renovables los producen en menor escala, todo va a depender del tipo de tecnología que se emplee, por lo que es posible tomar medidas y alternativas para evitar en lo menos posible causar impactos medioambientales. Dentro de las alternativas se encuentran las energías renovables que básicamente incluyen: energía eólica, solar, geotérmica, hidroeléctrica y de biomasa (Moreno & López, 2008).

Dentro de las materias primas esenciales para obtener energías renovables, tenemos como componentes principales la utilización de los aceites y grasas para la producción de biodiesel, caracterizando su composición y su origen, es decir, si tienen procedencia animal o vegetal, además de su naturaleza química (Hernández, Santamaría & Ríos, 2009). Los aceites de procedencia vegetal han sido la principal fuente de materia prima en la producción de biocombustible, entre los más usados tenemos los de palma, colza, soya, girasol, coco, cacahuate, oliva, mostaza, entre otros; sin embargo, existen inconvenientes debido

a la competencia con las industria alimenticia, con respecto al uso de suelo, en cuanto al requerimiento de grandes hectáreas de terreno fértil, por lo que conllevaría a la reducción de suelos cultivables, por otra parte, presentan largos periodos de producción, restringido rendimiento lipídico (<5% del peso seco total), fertilidad de los suelos, ubicación geográfica y como ya mencionó la necesidad de utilización de extensas superficies de cultivo, sumado al mayor consumo de agua para el riego (Garibay, Vásquez-Duhalt, Sánchez, Serrano & Martínez, 2009). Por esa razón, la búsqueda de nuevas alternativas que aporten sustentabilidad a las industrias productoras de biodiesel, tiene como objetivo la utilización de lípidos de microalgas.

El biodiesel es un tipo de combustible obtenido de materias renovales, es descrito como una mezcla de esteres de alquilo con cadenas largas de ácidos grasos. En los últimos años la producción de biodiesel está dirigido al uso de aceites vegetales, sin embargo, la nueva alternativa se basa en la utilización de aceites de microalgas (Ramírez, Vela & Rincón, 2012).

Las microalgas son utilizadas actualmente en la producción de metabolitos primarios y secundarios (lípidos, proteínas, polisacáridos, pigmentos y aminoácidos) con fines de interés científico y comercial, además de crecer en casi todos los ambientes donde la luz solar es suficiente (Díaz, 2012).

Dentro de los usos más relevantes de la producción de microalgas, es su utilización como suplementos nutricionales, y un alto grado de interés en la obtención de biocombustibles. En el caso de la producción de biocombustible tiene mucho interés debido a que se estima que para el 2040 habrá un agotamiento de las reservas de petróleo, además del consabido incremento del CO₂ atmosférico por la quema de combustibles fósiles, con el consabido cambio climático (López, 2008; Castillo *et al.*, 2017).

La producción de biomasa de microalgas surge como alternativa de recursos renovables por sus grandes ventajas: fuente renovable de aceites, capacidad para desarrollarse en aguas residuales, gran capacidad fotosintética, altas tasas de crecimiento, áreas reducidas para el cultivo, alto contenido lipídico y de ácidos grasos; por otra parte, a diferencia de la utilización de productos de origen vegetal como materia prima, esta no necesita del uso de tierras de cultivo y no existe competencia con la producción de alimentos. Además, se conoce que pueden adaptarse a concentraciones elevadas de CO₂ y NO₂, estos microorganismos son los encargados del 50% de la producción de oxígeno y de la fijación de carbono del planeta (Arias, Cañizares & Martínez, 2013; Galarza, 2019).

6. Biomasa de microalgas como biomasa bioenergética

La producción de microalgas a nivel industrial es considerada una de las grandes alternativas para la obtención de energía biomásica, y de otros compuestos de alto valor agregado, y con el añadido de utilizar aguas residuales (Fig. 3). La utilización de microalgas para la producción de lípidos ha demostrado un alto rendimiento, la mayor parte de las microalgas conocidas acumulan ácidos grasos, triglicéridos y glicolípidos de forma intracelular, sin embargo hay otros que no involucran procesos de extracción como es el caso de *Botryococcus braunii* (Castillo *et al.*, 2017) con especial énfasis en la biosíntesis

de ácidos grasos y triglicéridos, la producción de biomasa, las técnicas de extracción, los procesos biotecnológicos implementados en sistemas de cultivo, la transesterificación y los sistemas de doble propósito. Resultados. Las microalgas tienen rendimientos altos de producción de lípidos ($59 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). En algunos casos el contenido lipídico puede llegar a exceder el 80% del peso seco de la biomasa seca, sin embargo, generalmente oscilan entre 20-50% (Solovchenko, Khozin, Cohen & Merzlyak, 2009).

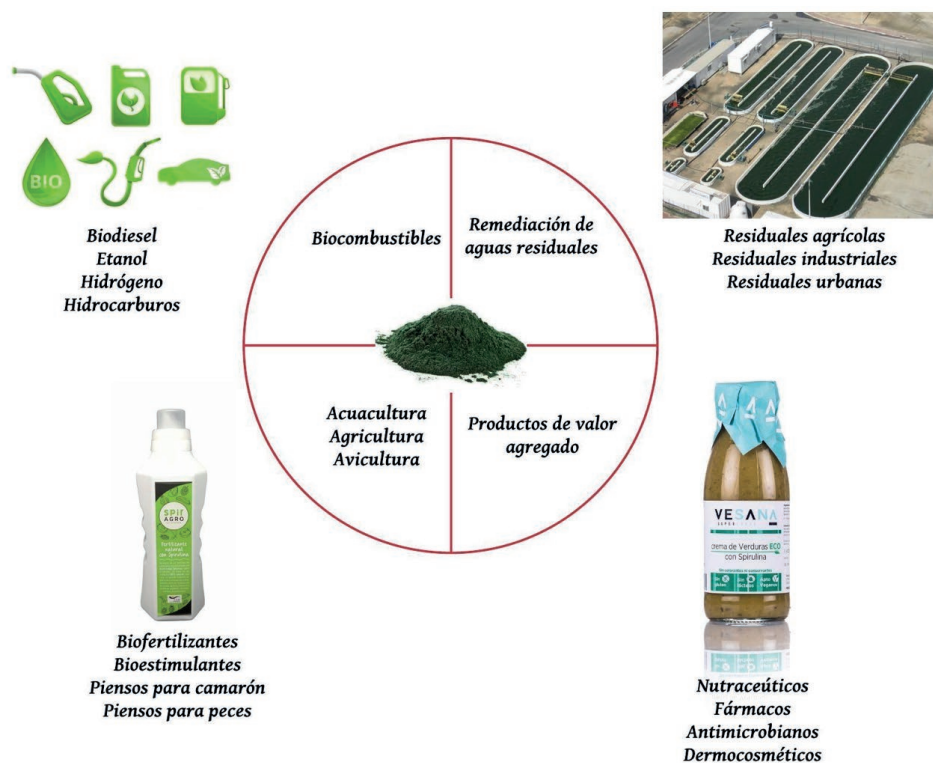


Figura 3. Aplicaciones del cultivo masivo de microalgas (Adaptado de Tiwari & Marella, 2020).

Se considera que el contenido lipídico es propio de cada especie, independientemente si son del mismo género, por esta razón se encuentran variaciones de este parámetro entre las especies individuales de cada grupo taxonómico (Tabla 2) (Montero et al., 2012).

Optimización de los procesos de extracción de biomasa Sólida para uso energético
 Parte B. Mejora de procesos de aprovechamiento energético de biomasa

Tabla 2. Contenido lipídico y productividad de microalgas marinas y dulceacuícolas (Montero *et al.*, 2012).

Especies de microalgas marinas y de agua dulce	Contenido de lípidos (% biomasa peso seco)	Productividad lipídica (mg L ⁻¹ día ⁻¹)	Productividad volumétrica de biomasa (g L ⁻¹ día ⁻¹)
<i>Ankistrodesmus</i> sp.	24.0-31.0	-	-
<i>Botryococcus braunii</i>	25.0-75.0	-	0.02
<i>Chaetoceros muelleri</i>	33.6	21.8	0.07
<i>Chaetoceros calcitrans</i>	14.6-16.4/39.8	17.6	0.04
<i>Chlorella emersonii</i>	25.0-63.0	10.3-50.0	0.036-0.041
<i>Chlorella protothecoides</i>	14.6-57.8	1214	2.00-7.70
<i>Chlorella sorokiniana</i>	19.0-22.0	44.7	0.23-1.47
<i>Chlorella vulgaris</i>	5.0-58.0	11.2-40.0	0.02-0.20
<i>Chlorella</i> sp.	10.0-48.0	42.1	0.02-2.5
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	2.0	-	2.90-3.64
<i>Chlorella</i>	18.0-57.0	18.7	-
<i>Chlorococcum</i> sp.	19.33	53.7	0.28
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20.0-51.1	-	10
<i>Dunaliella salina</i>	6.0-25.0	116.0	0.22-0.34
<i>Dunaliella primolecta</i>	23.1	-	0.09
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	16.7-71.0	-	0.12
<i>Dunaliella</i> sp.	17.5-67.0	33.5	-
<i>Ellipsoidion</i> sp.	27.4	47.3	0.17
<i>Euglena gracilis</i>	14.0-20.0	-	7.70
<i>Haematococcus pluvialis</i>	25.0	-	0.05-0.06
<i>Isochrysis galbana</i>	7.0-40.0	-	0.32-1.60
<i>Isochrysis</i> sp.	7.1-33	37.8	0.08-0.17
<i>Monodus subterraneus</i>	16.0	30.4	0.19
<i>Monallanthus salina</i>	20.0-22.0	-	0.08
<i>Nannochloris</i> sp.	20.0-56.0	60.9-76.5	0.17-0.51
<i>Nannochloropsis oculata</i>	22.7-29.7	84.0-142.0	0.37-0.48
<i>Nannochloropsis</i> sp.	12.0-53.0	37.6-90.0	0.17-1.43
<i>Neochloris oleoabundans</i>	29.00-65.0	90.0-134.0	-
<i>Nitzschia</i> sp.	16.0-47.0	-	-
<i>Oocystis pusilla</i>	10.5	-	-
<i>Pavlova salina</i>	30.9	49.4	0.16
<i>Pavlova lutheri</i>	35.5	40.2	0.14
<i>Porphyridium cruentum</i>	9.0-18.8/60.7	34.8	0.36-1.50
<i>Scenedesmus obliquus</i>	11.0-55.0	-	0.004-0.74
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	1.9-18.4	35.1	0.19
<i>Scenedesmus</i> sp.	19.6-21.1	40.8-53.9	0.03-0.23
<i>Skeletonema</i> sp.	13.3-31.8	27.3	0.09
<i>Skeletonema costatum</i>	13.5-51.3	17.4	0.08
<i>Spirulina platensis</i>	4.0-16.6	-	0.06-4.3
<i>Spirulina máxima</i>	4.0-9.0	-	0.21-0.25
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	20.6	17.4	0.08
<i>Tetraselmis suecica</i>	8.5-23.0	27.0-37.4	0.12-0.32
<i>Tetraselmis</i> sp.	12.6-14.7	43.4	0.30

La productividad y el contenido lipídico se encuentran inversamente relacionado, debido al elevado costo de la biosíntesis de lípidos. Aun así, un elevado contenido lipídico obtenido de la biomasa microalgal no asegura que esa especie sea utilizada como una fuente lipídica, debido a que en la mayoría de los casos especies que contenga mayor porcentaje lipídico son de crecimiento lento. Por lo tanto, la cepa que presente mejor combinación de productividad de biomasa y contenido lipídico será el mejor productor de lípidos (Cobos, Paredes & Castro, 2016; Mercado, 2016; Ardila, López, Vásquez, González & Barajas, 20176).

La producción de lípidos microalgales se divide en varias etapas: cultivo de biomasa, consiste en la administración de todos los parámetros y sistemas adecuados para el cultivo, como son: agua, nutrientes, CO₂ y luz; la cosecha: la separación del agua y los nutrientes para obtener la biomasa; el secado y extracción de lípidos, que posteriormente da lugar a la conversión de los lípidos extraídos a biodiesel y glicerol por medio del proceso de trans-esterificación, finalmente, la purificación del biodiesel producido; dentro de este proceso puede incluirse etapas adicionales para el aprovechamiento de subproductos (Pérez & Quishpi, 2014).

En el cultivo, la composición lipídica puede verse afectada por varios factores, tales como, el ciclo de vida y condiciones de cultivo, dentro de ellos se encuentra la composición del medio del cultivo, que conlleva a parámetros como son: nutrientes, temperatura, intensidad lumínica, ciclos de luz/oscuridad y aireación (Tejeda, Henao, Alvear & Castillo, 2015).

La producción de lípidos a partir de la biomasa de microalgas puede llegar a potenciarse mediante la modificación de los parámetros de cultivo, por ello, la disponibilidad de nutrientes es uno de los principales parámetros en consideración, debido a su directa relación con el crecimiento de las microalgas afectando en la composición lipídica y de ácidos grasos, es decir, en condiciones adecuadas la obtención de biomasa algal será elevada, pero la producción de lípidos será baja, sin embargo, en condiciones de cultivos inducidas a estrés, la mayoría de las microalgas tienen la capacidad a nivel metabólico de alterar sus rutas biosintéticas para la formación y acumulación de lípidos neutros (Cobos *et al.*, 2016); además, se puede llegar a obtenerse subproductos de alto valor agregado como: biopolímeros, pigmentos, biogás, antioxidantes, fármacos y nutracéuticos.

La estrategia mayormente utilizada para maximizar la acumulación de lípidos en un cultivo microalgal es la deficiencia de nitrógeno. El nitrógeno forma parte de los principales nutrientes para las microalgas, de tal manera, que no solo afecta directamente al metabolismo sino también al contenido de los pigmentos. Varias investigaciones demuestran la eficiencia de la inanición de nutrientes, basándose principalmente en la acumulación de triacilgliceroles (TAG) (Tabla 3).

Tabla 3. Efecto de la limitación de nutrientes sobre el contenido lipídico de microalgas.

Especies de microalgas	Estrés de nutrientes	Cambios en el perfil lipídico después de la inducción	Referencia
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> <i>Scenedesmus subspicatus</i>	Limitación de nitrógeno	Incremento en los lípidos totales (lípidos:relación amida)	Dean, Sigee, Estrada & Pittman, 2010
<i>Nannochloropsis Oculata</i>	Limitación de nitrógeno	Lípidos totales aumentados por 15.31%	Converti, Casazza, Ortiz, Perego & Del Borhi, 2009
<i>Chlorella vulgaris</i>	Limitación de nitrógeno.	Lípidos totales aumentados por 16.41%	Converti <i>et al.</i> , 2009
<i>Chlorella vulgaris</i>	Limitación de nitrógeno	Productividad lipídica de 78 mg L ⁻¹ d ⁻¹	Yeh & Chang, 2012. Yeh, Chen & Chang, 2012
<i>Chlorella sp.</i>	Limitación de nitrógeno	Productividad lipídica de 53.96 ± 0.63 mg L ⁻¹ d ⁻¹	Praveenkumar, Shameera, Mahalakshmi, Akbarsha & Thajuddin, 2012
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Limitación de nitrógeno	Los niveles de TAG aumentaron de 69 a 75%	Alonso, Belarbi, Fernández, Rodríguez & Molina, 2000
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	Limitación de nitrógeno	Cinco veces aumento en la fluorescencia lipídica	Chen, Lao & Jiang, 2011
<i>Chlorella vulgaris</i>	Medio nitrogenado	Lípidos aumentados en un 40%	Illman, Scragg & Shales, 2000
<i>Chlorella vulgaris</i>	Limitación de nitrógeno	Incremento en TAG.	Widjaja, Chien & Ju, 2009
<i>Chlorella sp.</i>	Condiciones carentes de nutrientes (nitrógeno, fosfato de potasio, hierro y los tres combinados)	Producción total de lípidos de 49.16 ± 1.36 mg L ⁻¹ d ⁻¹	Praveenkumar <i>et al.</i> , 2012
<i>Chlorella sp.</i>	Limitación de urea	Producción total de lípidos de 0.124 g L ⁻¹ d ⁻¹	Hsieh & Wu, 2009
<i>Neochloris Oleoabundans</i>	Nitrato de amonio	Productividad lipídica de 0.133 g L ⁻¹ d ⁻¹	Li <i>et al.</i> , 2008
<i>Scenedesmus sp.</i> <i>Coelastris sp.</i>	Efecto combinado de la limitación de P y N	Incremento en TAG	Gardner, Peters, Peyton & Cooksey, 2011
<i>Phaeodactylum tricornutum</i> <i>Chaetoceros sp.</i> <i>Isochrysis galbana</i>	Limitación de fósforo	Incremento de lípidos totales con mayor contenido relativo de 16:0 y 18:1	Reitan, Rainuzzo & Olsen, 1994
<i>Monodus subterraneus</i>	Limitación de fósforo	Incremento en TAG	Khazin-Goldberg & Cohen, 2006
<i>Scenedesmus sp.</i>	Inanición de nitrógeno y fósforo	Los lípidos aumentaron 30% y 53%, respectivamente	Xin, Ying, Ke & Xue, 2010
<i>Chlorella sp.</i>	Deficiencia de silicio	Los lípidos aumentaron 30% y 53%, respectivamente	Griffiths & Harrison, 2009
<i>Chlorella kessleri</i>	Limitación de fósforo	Aumento de FAts insaturados	El-Sheek & Rady, 1995
<i>Chlamydomonas Reinhardtii</i>	Limitación de azufre	Incremento en TAG	Matthew <i>et al.</i> , 2009
<i>Cyclotella cryptica</i>	Inanición de silicio	Incremento en el total de lípidos del 27.6% al 54.1%	Roessler, 1988

De la misma manera, se pueden inducir la acumulación de lípidos mediante la depleción del fósforo, azufre, hierro y silicio (caso de diatomeas); factores como la temperatura, influye en el perfil lipídico, teniendo a bajas temperaturas incremento en el grado de insaturación; en cuanto a la intensidad de luz, mientras más alta sea mayor será la acumulación de triglicéridos con un alto grado de saturación, por lo contrario, a bajas intensidades se sintetizarán lípidos polares insaturados, estructural y funcionalmente relacionados con las membranas; por último, factores como el pH y salinidad, también pueden llegar a modificar la acumulación de lípidos. La síntesis de lípidos se va a encontrar directamente relacionada con el tipo de especie y la magnitud del cambio de parámetros (Garibay-Hernández *et al.*, 2009).

En condiciones de estrés, la biomasa de *Scenedesmus* contiene valores altos (>17%) de contenido lipídico, extraídos con mezclas de solventes como cloroformo:metanol, metanol:hexano y cloroformo:etanol; por otra parte, el contenido de clorofila puede alcanzar valores de 12.69%. Sin embargo, ciertos autores al someter a los cultivos a la depleción de nutrientes de hasta un 50%, únicamente han logrado incrementos no significativos en la concentración de la fracción lipídica, así con *Chlorella* un incremento de 2.2% y con *Scenedesmus* un 3.1% de incremento (Pérez *et al.*, 2018).

7. Biocombustibles de Tercera Generación: Biomasa de Microalgas

Las microalgas constituyen el grupo más prometedor en la producción de Biocombustible de Tercera Generación (BTG). Se puede producir un aceite que después de ser refinado puede utilizarse como biodiésel, su rendimiento lipídico es diez veces más alto que los biocombustibles de segunda generación, y produce treinta veces más energía por unidad de superficie que los biocombustibles de primera generación. Cerca del 30% de la biomasa de especies de microalgas poseen lípidos que sirven para la flotabilidad en el agua por su menor densidad, y, a la vez, poder estar cerca de la superficie donde llega la luz solar y realizar la fotosíntesis (Catalán, 2007; Montero *et al.*, 2012; Chowdhury & Loganathan, 2019).

El cultivo de este tipo de microorganismos para la producción de biocombustibles tiene algunas ventajas: nula interferencia en la producción convencional de cultivos alimenticios, alta productividad en pocos días, gran absorción de CO₂ reduciendo el efecto invernadero y a la vez el cambio climático, biorremediación debido al uso de aguas residuales para una mayor producción de biocombustibles, el biocombustible generado a partir de microalgas puede ser de diversas formas (biodiesel, metano, etanol, butanol), cultivo en una variedad de superficies mientras la temperatura sea adecuada (estanques abiertos, fotobiorreactores, estanque interiores), duplicación de biomasa en menos de 24 h (40- 130 veces menos que cultivos vegetales), crecimiento en todo tipo de masas de agua debido a su adaptabilidad (residuales, agua estuaria, agua de mar) (Oswald, Benemann & Koopman, 1977; Aslan & Kapdan, 2006; Mata *et al.*, 2010; Harun, Singh, Forde & Danquah, 2010; Picazo, González & Manzaner, 2011).

La producción de biocombustibles a partir de microalgas no requiere grandes superficies. La empresa española *Bio Fuel Systems* asegura la obtención de 95 millones de barriles

de biopetróleo al día en 52000 km² (Catalán, 2007). Del cultivo de microalgas se pueden obtener diferentes tipos de biocombustibles, en relación con el bioetanol, se producen 17000-234000 L km⁻² de cultivo de maíz, mientras que se producen 9354000-14031000 L km⁻² de cultivos de algas, siendo de 40 a 60 veces la producción de este biocombustible con cultivos de algas (Razo *et al.*, 2007; Briones, 2012).

Respecto a la producción de biodiésel, el aceite acumulado por la mayoría de microalgas se constituye principalmente de triglicéridos (>80%) los mismos que pueden ser aprovechados para este tipo de biocombustibles (Papanikolaou, Chevalor, Komaitis & Marc, 2002). A pesar de las grandes ventajas del cultivo de microalgas, se presentan algunos inconvenientes: requieren de grandes cantidades de nutrientes como el N y el P que se suplementan como fertilizantes; costos de inversión, producción, procesado de biomasa y extracción de lípidos relativamente altos; consumo de agua significativo (Morone & Cottoni, 2016; Prateek & Sonu, 2016; Bowyer *et al.*, 2018).

8. Producción de Biogás a partir de biomasa de microalgas y cianobacterias

La biometanización o digestión anaerobia es un bioproceso basado en la descomposición de materia orgánica por el metabolismo microbiano en ausencia de oxígeno. Este proceso da lugar a digestatos y una mezcla de gases conocido como biogás que incluye, en mayor concentración, el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂), y en menor proporción gases como el hidrógeno (H₂) y el sulfuro de hidrógeno (SH₂). Es un proceso complejo donde intervienen varios grupos de microorganismos en etapas como la hidrólisis (Bacterias Gramnegativas), acidogénesis (Bacterias Gramnegativas del ácido láctico), acetogénesis (Sintrofobacterias) y metanogénesis (Bacterias metanogénicas). Estos productos que resultan de la digestión anaeróbica pueden emplearse como combustibles para generar electricidad o calor (biogás) y como fertilizantes en cultivos agrícolas (digestatos) (Gunaseelan, 1997; Lorenzo & Obaya, 2005; Ward, Hobbs, Holliman & Jones, 2008; Albuquerque, de la Fuente & Bernal, 2012).

9. Etapas de la digestión anaeróbica

Hidrólisis

Esta es la primera fase de la digestión anaeróbica (DA). Aquí un grupo de bacterias hidrolíticas descomponen las largas cadenas de materia orgánica mediante hidrólisis de macromoléculas como proteínas, carbohidratos, grasas, lípidos y ácidos nucleicos, degradándolas a moléculas más simples. Estos microorganismos tienen la capacidad de secretar enzimas que rompen estas macromoléculas o polímeros y las transforman en monómeros (Díaz, Fernández, Sárvari & Rodríguez, 2014; Adekunle & Okolie, 2015; Núñez, 2017).

En la hidrólisis toman protagonismo microorganismos estrictamente anaerobios, como *Clostridium*, *Streptococcus*, *Bacillus*, *Acetivibrio*, *Micrococcus* (Gallegos-García, Celis & Razo-Flores, 2010).

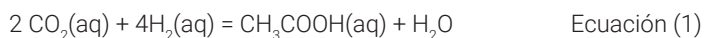
Acidogénesis

En esta fase las moléculas resultantes de la etapa hidrolítica son absorbidas y degradadas en ácidos orgánicos, como, ácido butírico, acético, propiónico. Las diferentes cepas de bacterias obligatorias y facultativas se encargan de convertir los azúcares, aminoácidos y lípidos en cetona, acetato, alcoholes, CO₂, H₂ y ácidos orgánicos volátiles y ácidos grasos. Entre los organismos que se hallan mayoritariamente en esta fase tenemos *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Ruminococcus*, *Bacillus* (Gallegos et al., 2010; Pire, Hernández, Carrasquero & Díaz, 2014).

Acetogénesis

Los productos que resultaron en la tercera fase son consumidos por el resto de microorganismos como un sustrato. Los compuestos son transformados y se obtiene como principales productos el CO₂, ácido acético, alcohol. El metabolismo de las bacterias acetogénicas va a ser directamente dependiente de las concentraciones de estos productos (Corrales, Antolinez, Bohórquez & Corredor, 2015; Adekunle & Okolie, 2015; Drake, 2012).

Como algunos ejemplos tenemos *Syntrophobacter wolinii*, *Acetobacterium woodi*, *Clostridium aceticum* y *Syntrophomonas wolfei*, *Acetoanaerobium*, *Acetogenium*. Estos organismos son llamados acetógenos (FAO, 2011; Corrales et al., 2015).

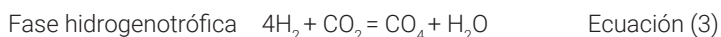
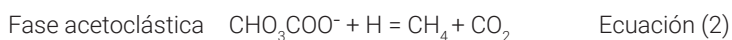


Metanogénesis

Esta es la fase final de la DA y la más lenta del proceso. En esta etapa el metano se forma a partir de dos rutas: la acetoclástica y la hidrogenotrófica. La vía acetoclástica se basa en el crecimiento de microorganismos en acetato produciendo metano y dióxido de carbono, mientras que en la vía hidrogenotrófica crecen en sustratos con H (hidrógeno) y CO₂ (dióxido de carbono) formando metano y agua (Parés & Juárez, 1997; Almeida et al., 2011; Adekunle & Okolie, 2015). La vía hidrogenotrófica aporta un 27-30% a la producción final del CH₄ (metano) y la vía acetoclástica un 70% (Carmona, Bolívar & Giraldo, 2005).

Algunos géneros de bacterias y arqueas metaogénicas: *Methanobrevibacter*, *Methanobacterium*, *Methanomicrobium*, *Bacteroides*, *Clostridium*, *Bifidobacterium*, *Sphaerophorus*, *Fusobacterium*, *Veillonella*, *Peptococcus*, *Desulfovibrio*, *Methanococcus*, *Methanospirillum*, *Methanosarcina*, *Methanothrix*, *Methanogenium* (Fig. 4) (Stewart, 1991; Ferrer & Pérez, 2010).

Fórmula general de las fases de la metanogénesis (Corrales et al., 2015).



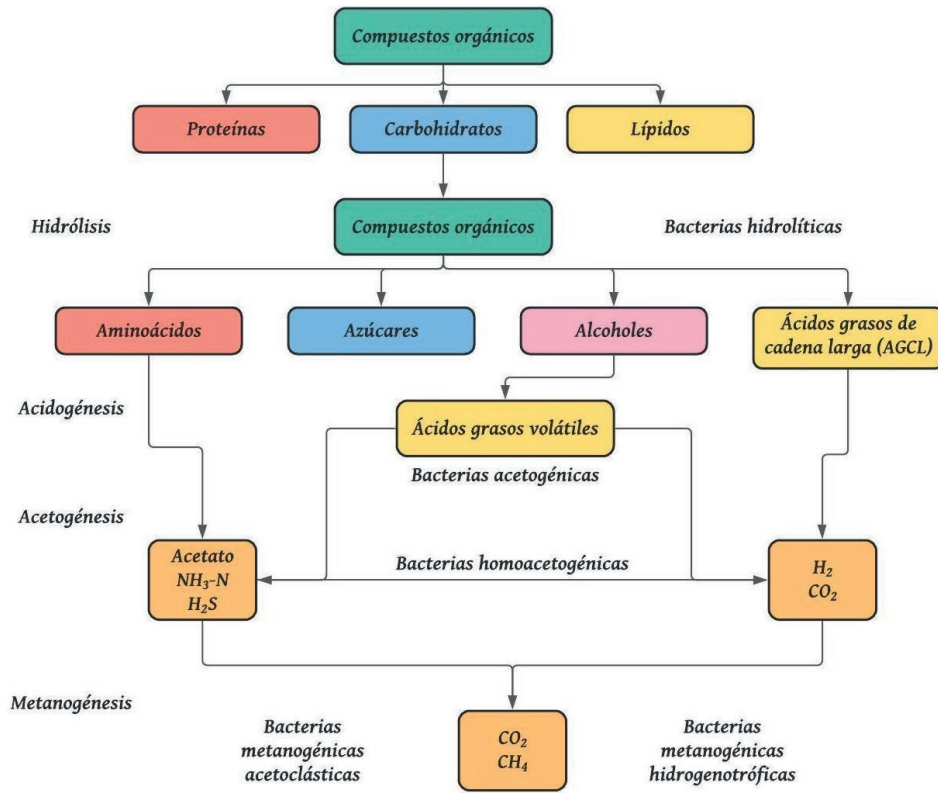


Figura 4. Etapas de la digestión anaeróbica (Adaptado de Massé & Droste, 2000).

Biomasa de microalgas y cianobacterias como sustrato de la DA

La biomasa de microalgas y cianobacterias ha sido muy poca utilizada como sustrato para la digestión anaeróbica en relación a otros sustratos orgánicos (Tabla 4) (Arroyo, Martínez & Paredes, 2014). La biomasa resultante de un cultivo de estos microorganismos en aguas residuales (biorremediación) puede ser empleada en la producción de distintas fuentes energéticas, por ejemplo, producción de biodiésel a partir de la extracción de lípidos microalgales y de biogás en base a los residuos restantes de la biomasa (Ichsan, Hadiyanto & Hendroko, 2014; Elsayed, Mohamed, Noke & Klöck, 2017).

Tabla 4. Cepas de microalgas y cianobacterias más utilizadas en la producción de biogás (metano).

Género empleado	Producción de Metano	Referencia
<i>Chlorella</i> , <i>Stigeoclonium</i> , <i>Scenedesmus</i> y <i>diatomeas</i>	Aumento significativo de metano (25- 40%)	Solé- Bundo, Garfi & Ferrer, 2018
<i>Chlorella</i>	62-64%	Golueke, Oswald & Gotaas, 1957
<i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus</i> & <i>Spirulina</i>	68-75%	Sánchez-Hernández & Travieso-Córdoba
<i>Spirulina maxima</i>	68- 72% 46-76%	Samson & LeDuy, 1982; 1986
<i>Chlorella</i> , <i>Scenedesmus</i>	69%	Yen & Brune, 2007
<i>Oscillatoria</i> , <i>Chlorella</i> y <i>Monoraphidium</i>	Incremento total de la producción de metano del 15- 62% respecto al control	González, 2016
<i>Scenedesmus</i>	Incremento cerca del 63%	Ramos, 2014

10. Obtención de biomasa de microalgas en aguas residuales agroindustriales

Las microalgas han demostrado tener la capacidad de ser cultivadas en agua residuales (*WW*) producto de las industrias, las *WW* son contaminantes para el medio ambiente y la característica representativa es su alto contenido de carbono orgánico y ciertos nutrientes como el nitrógeno y fósforo, que para un cultivo de microalgas es muy importante, por lo que, gracias a la capacidad de asimilación de las microalgas es posible la supervivencia del cultivo. Por ello, esta metodología es considerada una alternativa, no sólo por la integración de este tipo sistemas sino para producción de biomasa microalgal (Sacristán, Luna, Cadena & Alva, 2014; Salas, Benavides, Zermeño, Orta & Sánchez, 2015).

Los efluentes provenientes de la industria alimenticia son las de mayor producción, por lo que se hace posible su utilización como medio de cultivo, debido a su alto contenido de nutrientes como es el nitrógeno, fosforo, calcio, hierro, aluminio, entre otras, de esta manera alcanzar un máximo rendimiento de biomasa de microalgas, especialmente el contenido lipídico, por su utilidad en la producción de biocombustibles (Gómez, 2007; Salas *et al.*, 2015).

La mayoría de las investigaciones se centran en el cultivo de *Scenedesmus*, por su gran capacidad de adaptabilidad, crecimiento y productividad, además, se ha demostrado que tiene la capacidad de crecer en aguas residuales, por lo que hace más factible su cultivo, por ello, se reemplazaría la utilización del agua dulce por efluentes que a largo plazo son contaminantes por ser desechados sin ningún tratamiento (Méndez, Albarracín, Cravero & Salomón, 2010; Rosales, Rodríguez & Ballen, 2018).

Según las investigaciones realizadas por Méndez *et al.* (2010) en cultivos con efluentes urbanos, *S. quadricauda* alcanzó 5.9×10^5 células mL^{-1} en 12 días, también hubo una reducción en las concentraciones de nutrientes presentes en la residual, en el caso de las concentraciones del nitrógeno inorgánico y amonio (2.5 y 63.7 mg L^{-1}) disminuyeron a 1.5 y 3.5 mg L^{-1} , respectivamente, por otro lado, las concentraciones de nitrato, fosfato y fósforo total disminuyeron 94, 40 y 94%, respectivamente; *S. quadricauda* tiene la capacidad de

remoción de nutrientes, por tanto, es uno de los factores importantes para llevar a cabo la reducción de contaminación mejorando su calidad, y darle uso a la biomasa obtenida, ya sea en acuicultura, agricultura o fertilizantes.

En aguas residuales de industria procesadora de pescado el crecimiento de *Scenedesmus* sp., alcanzó una densidad de $7.4 \pm 0.2 \times 10^6$ células mL⁻¹, el contenido de biomasa seca fue de 4.4 ± 1 g L⁻¹, y en la producción de pigmentos como los carotenoides se obtuvo una concentración de 0.9 ± 0.4 µg mL⁻¹. De la misma manera, se demostró la capacidad en remoción de nutrientes, con un 100% la remoción total de nitrógeno amoniacal, y del 77.5% para el PO₄⁻³. Para el contenido proteico de la biomasa, se alcanzaron valores del 24.4% con el WW, siendo significativamente menor que el porcentaje proteico del control (33.2%) (Andrade, Vera, Cárdenas & Morales, 2009).

Según los resultados de Ji *et al.* (2015), el crecimiento de *S. obliquus* fue mayor en cultivos mantenidos en una mezcla de aguas residuales urbanas y aguas residuales de una industria alimenticia y un flujo de CO₂ con respecto al control (Bold Basal Medium), esto se debe a que la cepa presenta un grado de adaptación alto a la exposición del agua residual. Los cultivos mantenidos en el WW obtuvieron una biomasa de 0.44 g L⁻¹ y un contenido lipídico de 10-11 mg L⁻¹ d⁻¹; en la producción de carbohidratos obtuvieron 13-16 mg L⁻¹ d⁻¹.

Nurmayani, Sugiarti & Putra (2016) demostraron que el contenido nutricional del WW tiene un gran potencial para los cultivos de microalgas, además ayuda en los procesos de biorremediación. Con la cepa *Botryococcus braunii* confirmaron la utilización del agua residual frente a los medios de cultivos convencionales.

Se ha demostrado que en ciertas condiciones de estrés *Scenedesmus* tiende a acumular mayor cantidad de lípidos, varias investigaciones se centran en la limitación de nutrientes, debido que, los niveles de acumulación de lípidos pueden llegar a aumentar en un 40%, sin embargo, estas condiciones de estrés pueden disminuir la producción de células (Rodríguez, Torres, da Silva & Villanueva, 2014; Cobos, Castro & Cerdeira, 2014).

En investigaciones relacionadas a la deficiencia de nitrógeno para la inducción de la síntesis de lípidos, han demostrado que algunas de las especies del género *Chlorella* acumulan lípidos neutros, además de la acumulación del almidón; en algunos de los casos, la mejor fuente de nitrógeno es el nitrato para el caso de *Chlorella protothecoides*, *Dunaliella tertiolecta* y *Neochloris oleoabundans*, mientras que en el caso de *Scenedesmus dimorphus* y *Scenedesmus rubescens* hay mayor afinidad para urea y amonio (Zhang, Chen, He & Wang, 2013; Wang *et al.*, 2019).

Mandal & Mallick (2009) obtuvieron que bajo limitaciones de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en el cultivo de *S. obliquus*, la productividad lipídica fue evaluada a partir de la transferencia a condiciones de cultivo deficientes de nitrógeno y fosforo, alcanzando valores de concentración lipídica en peso seco de 30.0% para la depleción del P y de 43% para la limitación del N.

El contenido de acumulación lipídica varía según las concentraciones de nitrógeno, estudios realizados por Dixit, Singh & Singh (2019) en *Scenedesmus rotundus*-MG910488 a concentraciones de 3.5 mM de nitrato obtuvieron valores de 41.46%, al contrario de concentraciones de 0 mM del mismo compuesto donde la acumulación de lípidos fue menor con 29.22%.

También se han llevado a cabo estudios con variaciones de las condiciones tróficas del cultivo, es decir, fotoautotrófico (*FT*), heterotrófico (*HT*) y mixotrófico (*MT*). La búsqueda de nuevas alternativas para el cultivo masivo de microalgas se encuentra orientada a la implementación de cultivos heterotróficos y mixotróficos, con el objetivo de aumentar la productividad y altas concentraciones de metabolitos primarios (proteínas, lípidos y carbohidratos) que difieran de la condición fotoautotrófica. De manera que, el cultivo *FT* utiliza la energía lumínica, pulsaciones de CO_2 , el cultivo *HT* necesita compuestos orgánicos de carbono (glucosa, acetato) como fuente de energía, y la *MT* que mayormente se usa debido a las ventajas que aporta en comparación con las otras condiciones, la característica más resaltante es la eficiencia de asimilación tanto de los sustratos orgánicos e inorgánicos por parte de las microalgas (Pérez, 2009; Arias, Martínez & Cañizares, 2013; Heinrich, 2016).

Por otra parte, existen investigaciones donde han experimentado con la utilización combinada de dos condiciones tróficas, es decir, cultivar las microalgas en condición heterotrófica (fuente de carbono: glucosa) hasta la obtención de un inóculo robusto que soporte el cambio a la condición fototrófica y que su adaptación sea satisfactoria, de esta manera se induce una mejora de la productividad de biomasa algal. Otro de los casos es la utilización de melaza en un cultivo *HT* y *MT*, resultando la retención de la actividad fotosintética y de esa manera inducir el aumento en biomasa cuando fueron expuestos a la luz (Arias, Martínez & Cañizares, 2013; Pérez-García & Bashan, 2015; Sipaúba-Tavares, Tedesque & Scardoeli-Truzzi, 2019; Barros et al., 2019).

Las microalgas mantenidas en condiciones heterotróficas pueden presentar un mayor contenido de lípidos y productividad de biomasa, pero el costo adicional de la materia prima también es mayor y la eficiencia de transformación de energía es baja (Li, Han, Sommerfeld & Hu, 2011; Klok, Lamers, Martens, Draaisma & Wijffels, 2014). El crecimiento mixotrófico de algunas microalgas produce entre 3 y 10 veces más rendimientos de biomasa en comparación con la fototrofia (Bhatnagar, Chinnasamy, Singh & Das, 2011). Además, los prototecoides de *Chlorella* en cultivos mixotróficos pueden acumular un 69% más de productividad de lípidos con un 61.5% menos de liberación de CO_2 en relación con el crecimiento heterotrófico típico (Xiong, Gao, Yan, Wu & Wu, 2010).

La productividad de biomasa y compuestos metabólicos han sido evaluadas en las diferentes trofías, como es el caso de *Chlorella* sp., mostrando mayor productividad en el cultivo *HT*; otras cepas como *Spirulina platensis* y *Nostoc flagelliforme*, demostraron de igual forma su alta productividad de biomasa bajo condiciones *HT* y *MT*, siendo contrastado con un cultivo *FT* (Derner, Ohse, Villela, Carvalho & Fett, 2006; Ortiz, Cortés, Sánchez, Padilla & Otero, 2012; Torres, Cáceres, Roa, Suárez & Urbina, 2017).

Kamalanathan, Chaisutyakorn, Gleadow & Beardall (2018) cultivaron *Scenedesmus* sp. en dos condiciones tróficas (*MT* y *HT*) con diferentes fuentes de carbono (melaza y glucosa) evaluando el contenido lipídico, con el tratamiento basado en melaza de remolacha las células acumularon poco contenido lipídico tanto en el cultivo *MT* y *HT*, sin embargo, entre las dos condiciones de cultivo, la de mayor productividad es el cultivo *MT* (dos veces más). En condiciones *HT* las células tienden a dividirse con mayor velocidad sintetizando de esta manera lípidos más estructurales que neutros. Por otro lado, el cultivo basado en glucosa como fuente de carbono, para el caso del cultivo *HT* la máxima productividad fue mediante la adición de 5 g L^{-1} de glucosa alcanzando 0.75 g L^{-1} . En condiciones mixotróficas la mayor

concentración lipídica obtenida con 5 g L⁻¹ de glucosa alcanzó 33.1% lo que corresponde al total de lípidos con 0.88 g L⁻¹.

Consecuentemente en un cultivo en condiciones *HT* la productividad va a depender de las concentraciones del sustrato orgánico, así lo indican El-Sheekh, Bedaiwy, Osman & Ismail (2014), donde evidenciaron el aumento tanto de la biomasa, como la composición bioquímica, variando conforme aumento el tiempo de cultivo. Con respecto al crecimiento, al cabo de 8 días aumentó en un 107%, lo que en un cultivo fotoautótrofo no se evidenciaría; el peso seco, fue considerablemente alto mostrando casi un 400% de incremento contrastado con un cultivo en condiciones *FT*. De la misma manera ocurrió con los carbohidratos, el aumento fue significativo pasando de 42-85%. Para lípidos hubo una inducción al aumento de 12-62.22%. Con los resultados obtenidos se puede evidenciar que la suplementación de la melaza al medio de cultivo es viable, por permitir a las microalgas producir mayores cantidades de biomasa y productos celulares que en un cultivo fotoautótrofos que es el más utilizado, sin embargo es más costoso que uno proveniente de residuos industriales.

Los cultivos mixotróficos, dependiendo de la adaptabilidad de las cepas y de la fuente de carbono utilizada, tendrán un mayor contenido de compuestos metabólicos. Rai & Gupta (2016) evaluaron el crecimiento y productividad de lípidos con diferentes concentraciones de glicerol (0-5% v/v) como fuente de carbono, los cultivos con glicerol (1%) obtuvieron la máxima producción de biomasa (0.42 g L⁻¹), resultado dos veces mayor con respecto al cultivo fotoautótrofo control (0.23 g L⁻¹). El mayor contenido lipídico en biomasa seca se presentó con los cultivos con el 5% de glicerol (53.32%) pero con la menor producción de biomasa.

11. Biorrefinerías de microalgas

La industrialización y el crecimiento urbano ha tenido como consecuencia el aumento del uso de combustibles fósiles, recurso no renovable que a través de los años ha disminuido drásticamente debido a su alta demanda y el desarrollo tecnológico, y que a futuro podría representar una crisis energética global (Chaudhary & Khattar, 2019); además y no menos importante, el impacto negativo que su explotación tiene en el ecosistema (Demirbas & Demirbas, 2010). Debido a ello se estudia diferentes fuentes para la obtención de biocombustibles que, a diferencia de la fuente original, sea amigable con el ambiente y sostenible para su producción a gran escala.

Desde este punto de vista, las microalgas llaman la atención de la comunidad científica por su capacidad de utilizar energía lumínica, captar el CO₂ y asimilar nutrientes del medio, para producir o almacenar energía en forma de lípidos (Bellou *et al.*, 2014; Odjadjare, Mutanda, Chen & Olaniran, 2018), además de la obtención de otros compuestos de alto valor agregado, como: proteínas, carbohidratos, pigmentos (clorofila-*a* y carotenoides), minerales y vitaminas (Hong *et al.*, 2012).

La producción a gran escala para la obtención de lípidos microalgales presenta una gran desventaja, que se ve reflejada en los costos de producción de la biomasa (uso de nutrientes inorgánicos de grado analítico) y los procesos de extracción implicados (Oliveira, Ganesellaa, Silvab, Matic & Caetano, 2017). Sin embargo, esta problemática en cuanto

a la producción de biomasa puede ser superada mediante el uso de fuentes alternas de sustratos orgánicos, como: aguas residuales, subproductos industriales, material lignocelulósico, fertilizantes de grado comercial, etc., que suplan los requerimientos nutricionales de estos microorganismos (Pérez-García & Bashan, 2015); y los procesos de extracción, mediante el aprovechamiento de todos los compuestos bioquímicos obtenidos de la biomasa microalgal; en un proceso conocido como biorrefinería de microalgas (Chen, Wang, Qiu & Ge, 2018).

Una biorrefinería, tal como una refinería de petróleo, emplea cada componente de la biomasa para generar productos que sean utilizables y comercializables (Fig. 5), ofreciendo la oportunidad de desplegar procesos sostenibles considerando la biomasa como materia prima renovable, ya que proviene directa o indirectamente de productos fotosintéticos o residuos industriales ricos en materia orgánica (Giraldo-Calderón, Romo-Buchelly, Arbeláez-Pérez, Echeverri-Hincapié & Atehortúa-Garcés, 2018). Además, al utilizarse todos los elementos de la biomasa, el costo general para la elaboración de cualquier producto se reduce (Chisti, 2007).

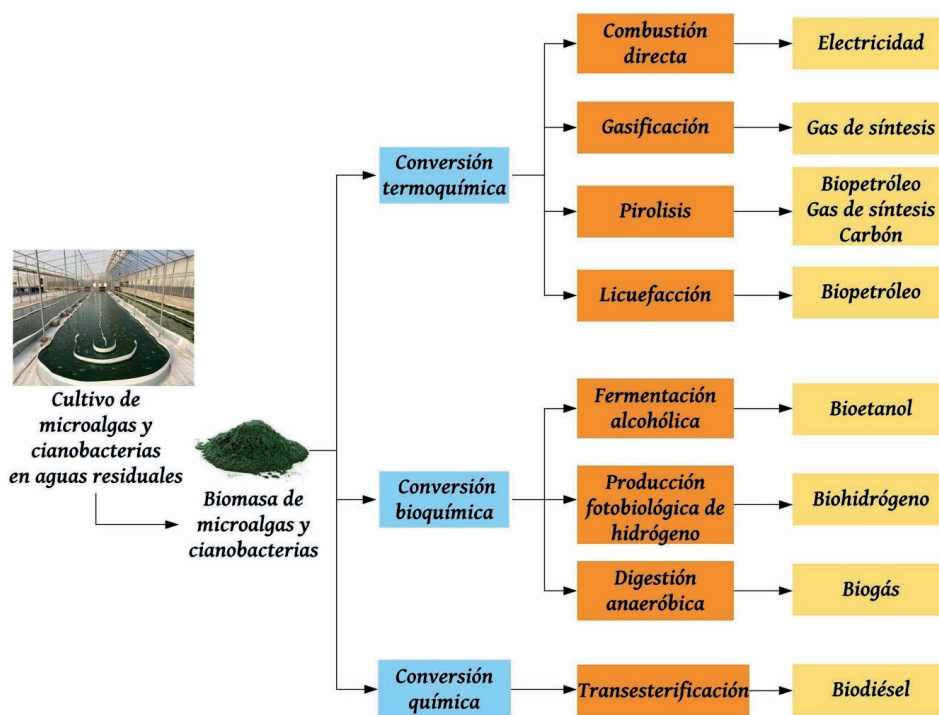


Figura 5. Procesos de conversión de biomasa microalgal en una biorrefinería (Adaptado de Wang et al., 2018).

De acuerdo a esta perspectiva, para reducir los costos de producción de biodiesel a partir del contenido lipídico microalgal se puede utilizar otros elementos de la biomasa, como: pigmentos, proteínas y carbohidratos (Mirón *et al.*, 2003). Los pigmentos y proteínas presentes en las microalgas exhiben propiedades de interés para las industrias farmacéuticas, los carbohidratos pueden ser utilizados como fuente de carbono en industrias de fermentación para reemplazar las fuentes de carbohidratos convencionales como son los azúcares simples o la biomasa lignocelulósica, mientras que los ácidos grasos de cadena larga pueden emplearse como complemento alimenticio (Chew *et al.*, 2017). Los productos y subproductos extraídos dependerán en gran medida de la microalga utilizada (Vanthoor-Koopmans, Wijffels, Barbosa & Eppink, 2013). En consecuencia, una biorrefinería de microalgas puede generar a la vez, biodiesel, alimentos para animales, biogás y energía eléctrica. Las técnicas de biorrefinería que se emplean son necesarias para aprovechar todos los productos generados en la biomasa de las microalgas posteriormente al cultivo (Vanthoor-Koopmans *et al.*, 2013). Actualmente, el número de productos obtenido bajo este sistema son de tres a cuatro metabolitos, tal y como se observa en la Tabla 5, donde se resumen los últimos avances (Giraldo-Calderón *et al.*, 2018).

Tabla 5. Trabajos experimentales en biorrefinería de microalgas.

Microalgas	Productos	Referencias
<i>Chlorella protothecoides</i>	Biodiesel, pigmentos	Campenni <i>et al.</i> , 2013
<i>Chlorella vulgaris</i>	Biodiesel, biogás	Collet <i>et al.</i> , 2011
<i>Chlorella vulgaris</i>	Pigmentos, bioelectricidad	Gouveia, Neves, Sebastião, Nobre & Matos, 2014
<i>Chlorella</i> sp.	Biodiesel, biogás	Ehimen, Sun, Carrington, Birch & Eaton-Rye, 2011
<i>Nanochloropsis</i> sp.	Biodiesel, biogás, pigmentos	Nobre <i>et al.</i> , 2013
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	Biodiesel, bioetanol	Lee <i>et al.</i> , 2013
<i>Dunaliella salina</i>	Biodiesel, biogás	Sialve, Bernet & Bernad, 2009
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Biohidrógeno, biogás	Mussnug, Klassen, Schlüter & Kruse, 2010
<i>Spirogyra</i> sp.	Biohidrógeno, pigmentos	Pacheco <i>et al.</i> , 2015
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Biodiesel, ácidos grasos	Gilbert-López, Barranco, Herrero, Cifuentes & Ibáñez, 2017
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Biodiesel, biogás, ácidos grasos, pigmentos	Patnaik & Mallick, 2015
<i>Isochrysis galbana</i>	Pigmentos, ácidos grasos	Gilbert-López <i>et al.</i> , 2015
<i>Tetraselmis suecica</i>	Pigmentos, ácidos grasos	Pérez-Lopez <i>et al.</i> , 2014

12. Producción de biomasa microalgal (*Scenedesmus* sp.) en aguas residuales de una industria láctea para la obtención de lípidos, caso Ecuador

Aguas residuales lácteas

El crecimiento de la población mundial ha determinado de igual forma el aumento y la demanda de la producción de lácteos en donde esta industria intenta responder a las exigencias poblacionales competitivas, es así que tratan de que la producción responda a estas pero sin tener en cuenta que también aumenta la producción de aguas residuales lácteas que deben someterse a tratamientos que minimicen impactos y afectaciones al medio ambiente (Kushwaha, Srivastava & Mall, 2011).

Este campo agroindustrial se dedica a la elaboración de diversos tipos de productos lácteos entre ellos: la leche líquida, la mantequilla y el queso, yogur, leche condensada, leche saborizada, leche en polvo, helado, etc. Otros subproductos típicos obtenidos que incluyen suero de mantequilla, suero de leche, y sus derivados (Kushwaha *et al.*, 2011). Es así una de las industrias alimentarias más contaminantes, en volumen (generando a partir de 0.2 a 10 L de efluente por litro de leche procesada) en cuanto a su gran consumo de agua (Vourch, Balannec, Chaufer & Dorange, 2008).

Existen procesos muy comunes en la mayoría de plantas para operar, homogenizar, estandarizar, clarificar, separar y pasteurizar, sin embargo, las aguas residuales de la industria láctea se generan principalmente a partir de las operaciones de limpieza y lavado en el tratamiento de la leche, (Fig. 6). Se estima que el consumo de agua es alrededor de un máximo de 10 L de agua por kilogramo del total de la leche procesada que se desperdicia en los desagües, (De Cataluña, 2002; Kushwaha *et al.*, 2011) principalmente a partir de las operaciones de limpieza y lavado de la planta de tratamiento de leche y se determina que son 2.5 veces el volumen de la leche procesada. (Ramamamy, Gajalakshmi, Sanjeevi, Jithesh & Abbasi, 2004).

El campo industrial procesador de lácteos en el mundo, descarga aguas residuales que se caracterizan por una alta demanda química y biológica de oxígeno, nutrientes y productos orgánicos e inorgánicos (Kushwaha *et al.*, 2011). La cuantificación de aguas residuales se podría caracterizar por su fuerte color, olor desagradable, alta DBO (40-48000 mg L⁻¹), alta DQO (80-95000 mg L⁻¹) (Kushwaha *et al.*, 2011), además de nutrientes tales como N (14-830 mg L⁻¹) y P (9-280 mg L⁻¹) que favorecen el crecimiento y producción de diferentes cepas de microalgas y cianobacterias (Gavala, Kopsinis, Skiadas, Stamatelatos & Lyberatos, 1999). El pH varía en el rango de 4.7-11 y la concentración de sólidos en suspensión (SS) varía en el rango de 0.024-4.5 g L⁻¹ (Tabla 6) (Passeggi, López & Borzacconi, 2009). Estos nutrientes (N y P) causan la eutrofización del agua y los detergentes afectan a la vida acuática, generando problemas con impactos ambientales debido a aguas vertidas, no tratadas o parcialmente tratadas (Montuelle, Coillard & Le Hy, 1992).

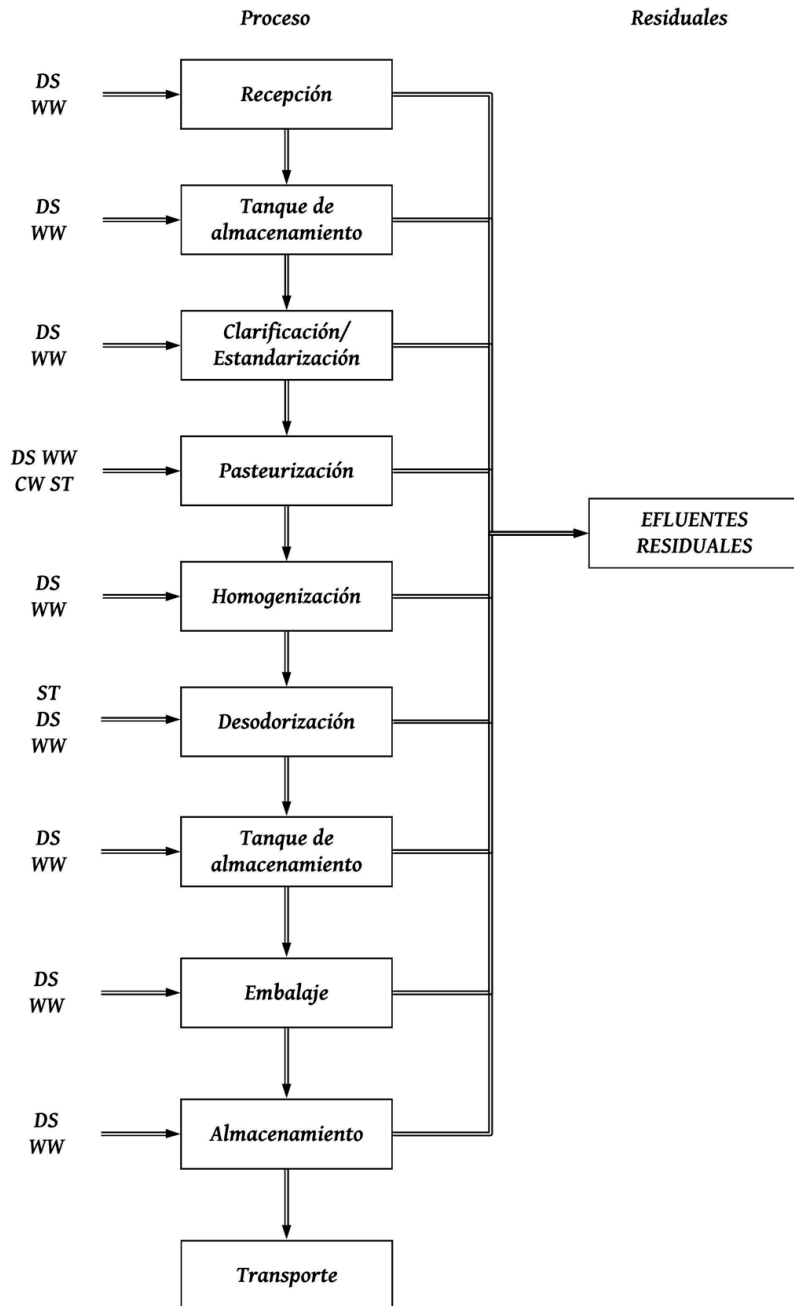


Figura 6. Generación de efluentes de varias unidades de procesamiento de leche. DS-detergentes y agentes desinfectantes, WW-agua de limpieza, ST-vapor, CW-agua de enfriamiento (Adaptado de Kushwaha et al., 2011).

Tabla 6. Características de aguas residuales lácteas.

Característica	Leche de consumo	Queso	Derivados lácteos
pH	8.5	5.0-6.9	8.5
DQO (mg L ⁻¹)	1775	4500	4000
DBO (mg L ⁻¹)	1050	2750	1750
TSS (mg L ⁻¹)	435	850	825
P (mg L ⁻¹)	20	35	6.25
NTK (mg L ⁻¹)	65	100	100
Conductividad $\mu\text{S cm}^{-1}$	1650	3150	1250
Cloruros (mg L ⁻¹)	140	220	100
Nitratos (mg L ⁻¹)	50	105	90
Nitritos (mg L ⁻¹)	10	35	0.2
Lípidos (mg L ⁻¹)	105	365	110
Detergentes (mg L ⁻¹)	3.5	7	7.5

La composición estándar de las aguas residuales lácteas contiene un 34.98% de proteína bruta, lactosa 4.42%, 9.77% de fibra bruta, grasa bruta 11.04%, 2.33% de calcio, 1.05% de fósforo y mg de 0.4% sobre la base de la materia seca (Marlina, 2007), con un contenido de nutrientes alto y completo a partir de una fuente de carbono, nitrógeno y fósforo como macro nutrientes (Nurmayani *et al.*, 2016).

El Ecuador no existe el monitoreo de los efluentes de industrias lácteas, a pesar de que la producción nacional de leche para el 2014 fue de dos millones de litros diarios, con una proyección de crecimiento del 30% anual (Ministerio de Industrias y Productividad, 2014; FAO & CIL, 2015), con la correspondiente generación de ingentes volúmenes de aguas residuales lácteas (*DIWW*) ($4-200 \times 10^5 \text{ L d}^{-1}$).

Las microalgas y cianobacterias tienen un gran potencial para generar biomasa a partir de estas aguas residuales, ya que utilizan esta materia prima para generar productos, que en comparación a otros métodos de producción tendrá muchas ventajas que mejoran la calidad, aumentan la producción y es sostenible medioambientalmente (Guruvaiah, Shah & Shah, 2014). Tienen una capacidad fotosintética que aprovecha la luz solar y componentes de las aguas residuales para producir biomasa y mejorar la calidad de agua (De la Noüe & De Pauw, 1988). Por lo anteriormente expuesto se planteó producir biomasa microalgal mediante el cultivo en fotobiorreactores con aguas residuales de una industria láctea.

Producción de biomasa microalgal con alto contenido lipídico en DIWW

Microorganismo y condiciones de cultivo

La clorofita *Scenedesmus* sp. (Fig. 7), se cultivó por triplicado en fotobiorreactores de 150 mL con un diámetro de 4.0 cm, bajo un régimen de iluminación circadiano 12 h luz/12 h oscuridad, con una irradiancia de $100 \text{ m}^2 \text{ fotón m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Los biorreactores se suplementaron con un flujo continuo de aire y pulsos de CO_2 en orden para mantener el pH 8.0 ± 0.3 . Los cultivos se inocularon con cultivo de fase logarítmica con una densidad celular de 15×10^6 células mL^{-1} (Fig. 8).

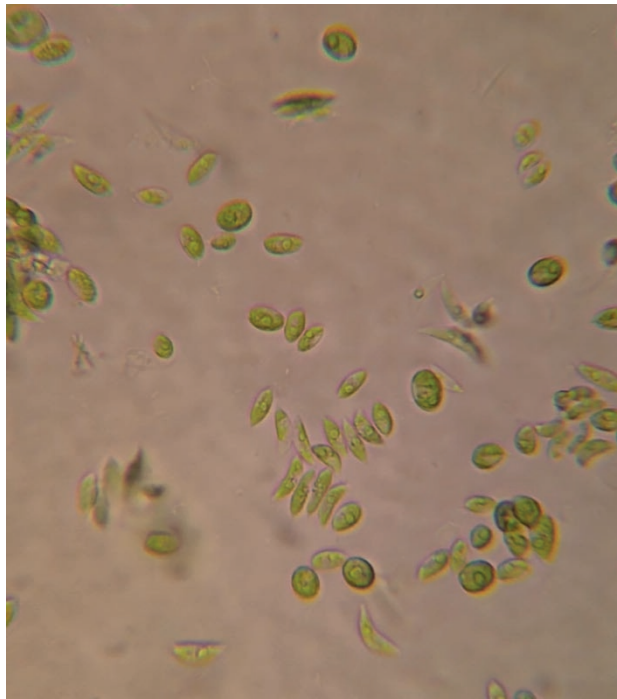


Figura 7. Microalga clorofita *Scenedesmus* sp. Magnificación 40x.



Figura 8. Sistema de fotobiorreactores.

Como control se utilizaron cultivos mantenidos en el medio de cultivo estándar BG11 (Allen, 1968), con la siguiente composición: NaNO_3 17.65 mM; K_2HPO_4 0.23 mM; $\text{mg-SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.30 mM; $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.25 mM; Ácido cítrico 0.03 mM; Citrato de amonio férrico 0.03 mM; EDTA 0.003 mM; Na_2CO_3 0.38 mM; H_3BO_3 0.046 mM; $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.009 mM; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.0008 mM; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.0016 mM; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.0003 mM; y $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.0002 mM. Para los tratamientos se utilizó una mezcla de *D/WW* y agua de mar 35 % (v/v 80:20); el *D/WW* presentó una concentración de nitrógeno total (NT) de 2.22 mM y de fosfato (PO_4^{3-}) de 0.20 mM, por esta razón se realizó una corrección nutricional con el nutriente foliar Bayfolan[®], para alcanzar una concentración final de N 20.80 mM y de P 1.67 mM; y debido al pH ácido del agua residual (5.5), producto de la fermentación de la lactosa, se ajustó a 8.0 ± 0.3 con NaOH 1 M.

Determinación de parámetros cinéticos

La concentración celular se determinó por conteo diario en microscopio óptico, hasta que el cultivo alcanzó la fase estacionaria, usando una cámara de Neubauer; según la Ecuación:

$$\text{Células mL}^{-1} = \frac{\text{Total células contadas} \times 10.000}{\text{Número de Cuadros}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

(International Committee for Standardization Haematology, 1988).

Para determinar el peso seco y con este valor la productividad de los cultivos, se empleó el método de Zhu & Lee (1997), que consistió en utilizar filtros de fibra de vidrio *Whatman*[®] GF/F de 47 mm de diámetro y 0.7 μm de diámetro de poro. Los filtros se secaron en estufa a 90°C durante 24 h, colocados en un desecador con SiO_2 (para evitar que los filtros adquieran humedad) y pesados en balanza analítica. Registrado los pesos, los filtros se devolvieron al secador y se procedió a filtrar 10 mL de cultivo de cada uno de los controles y tratamientos. Las sales presentes en los medios de cultivo se eliminaron por adición de 10 mL de HCO_2NH_4 0.5 mM (Formiato de Amonio) durante el filtrado. Los filtros se secaron en estufa a 80°C por 24 h y pesados en balanza analítica. El peso seco se obtuvo de por diferencia entre el filtro con la muestra filtrada seca y el peso del filtro seco.

Determinación de la composición bioquímica de la biomasa

Los carbohidratos de la biomasa, se determinaron por el método del fenol-sulfúrico de Dubois, Gilles, Hamilton, Rebers & Smith (1956). El pellet de 1 mL del cultivo centrifugado fue resuspendido en 1 mL de NaOH 1N, se agitó en vórtex y se procedió a sonicar 30 s a 4 °C. Se centrifugó a 8000 g durante 25 min a 4 °C, se utilizaron 100 mL de cada muestra por triplicado y se agregaron 900 mL de agua destilada (dilución 1/10), se añadieron 25 mL de fenol al 80%, se agitó en vórtex e inmediatamente se añadieron 2.5 mL de H_2SO_4 concentrado, agitando nuevamente; se dejó enfriar a temperatura ambiente durante 30 min. Todo el proceso se realizó en la campana de gases debido a la característica tóxica del fenol. Se midió la absorbancia a 485 nm antes de dos horas. La concentración de carbohidratos de las muestras se determinó por interpolación de los valores de absorbancia en la curva patrón de glucosa ajustada a la ecuación de una recta de regresión lineal.

Para la determinación del contenido proteico se utilizó el método de Lowry, Rosebrough, Farr & Randall (1951) modificado por Herbert, Phipps & Strange (1971). Se centrifugaron 10 mL del cultivo, se eliminó el sobrenadante. Se añadieron al pellet 2 mL de NaOH 1 N, se mezcló y se colocó en un baño termostatado a 95 °C durante una hora. Se dejó enfriar a temperatura ambiente durante 15 min. Posteriormente se centrifugó a 3800 g durante 15 min a temperatura ambiente. Se transfirieron 0.1 mL del sobrenadante a un nuevo tubo por triplicado, se adicionaron 0.3 mL de NaOH 1 N, para posteriormente añadir 0.4 mL de agua destilada. Se añadieron 2 mL de la solución de Cu-Tartrato saturada, se mezcló y dejó reaccionar durante 10 min. Se adicionaron 0.4 mL del reactivo diluido de Folin-Ciocalteu, se mezcló inmediatamente y dejó a temperatura ambiente durante 30 min. El porcentaje proteico de las muestras se determinó por interpolación de los valores de absorbancia en la curva patrón de albúmina de suero bovino BSA ajustada a la ecuación de una recta de regresión lineal.

La extracción lipídica se realizó según el método propuesto por Bligh & Dyer (1959): a 5 mg de biomasa seca se le adicionaron 3 mL de metanol y 1.5 mL de cloroformo (v/v 2:1). La mezcla se sonicó 15 minutos en frío y se llevó a baño termostatado a 50°C por 30 min. Las muestras se dejaron enfriar a temperatura ambiente y centrifugaron a 3900 rpm por 10 min, al sobrenadante se le agregaron 1.5 mL de cloroformo y 1.5 mL de agua destilada, y agitó en vórtex hasta homogenización. Se centrifugó a 3900 rpm durante 5 min. La fase acuosa (superior) se retiró y a la fase orgánica se añadió 0.5 mL de acetona para eliminar material traza del agua, se dejó evaporar a totalidad con flujo de nitrógeno y re-suspendió en 1 mL de cloroformo. El método de carbonización simple de Marsh & Weinstein (1966) se utilizó para la determinación espectrofotométrica de lípidos: 100 µL de muestra repartida por triplicado en tubos de ensayo de vidrio, se evaporó. Posteriormente se adicionó 2 mL de H₂SO₄ concentrado y llevó a carbonización simple por 15 min a 200°C; el blanco consistió de 2 mL de H₂SO₄ concentrado. Los tubos se enfriaron y se le añadieron 3 mL de agua destilada, se agitó en vórtex y dejó enfriar. Las muestras fueron leídas en espectrofotómetro a 375 nm, los valores de absorbancia obtenidos se interpolaron en base a la ecuación de la recta de la curva tripalmitina-cloroformo, para obtener la concentración de lípidos.

Determinación de nutrientes en el sobrenadante y la biomasa

Al final de los cultivos (día once), se tomaron muestras (10 mL), se centrifugaron a 17100 g durante 15 minutos y el pellet se liofilizó para la determinación de los nutrientes en el fotómetro Lovibond®. El nitrógeno total (NT) y PO₄³⁻ de la biomasa se analizaron con una adaptación del método de digestión de persulfato (D'Elia, Steudler & Corwin, 1977) y el método del vanadato-molibdato (Tandon, Cescas & Tyner, 1968) respectivamente.

Análisis estadístico

Los gráficos y el análisis estadístico se realizaron con el programa *Prism* versión 9.1.2 de *GraphPad Software, Inc.*®. Como condición previa para la utilización de pruebas paramétricas se comprobó la distribución normal de los datos de cada uno de los tratamientos evaluados. La normalidad se comprobó aplicando la variante Lilliefors del Test no paramétrico Kolmogorov-Smirnov. Esta variante estandariza las variables para su comprobación con la distribución normal de media cero y desviación estándar 1. Posteriormente al

comprobar la normalidad, los resultados obtenidos fueron analizados utilizando la prueba paramétrica ANOVA de doble y una vía y *post hoc* el test de Tukey con un nivel de significación de $P \leq 0.05$.

Resultados

Parámetros cinéticos

El crecimiento de *Scenedesmus* sp. medido como número de células mL^{-1} , no presentó diferencias significativas entre los cultivos mantenidos con el *DIWW* ($43.5 \pm 1.4 \times 10^6$ células mL^{-1}) y los cultivos mantenidos con el medio estándar (BG11) ($44.5 \pm 3.4 \times 10^6$ células mL^{-1}) (test de Tukey $P \leq 0.05$) (Fig. 9). El *DIWW* con la respectiva corrección nutricional soporta el crecimiento de *Scenedesmus* sp.

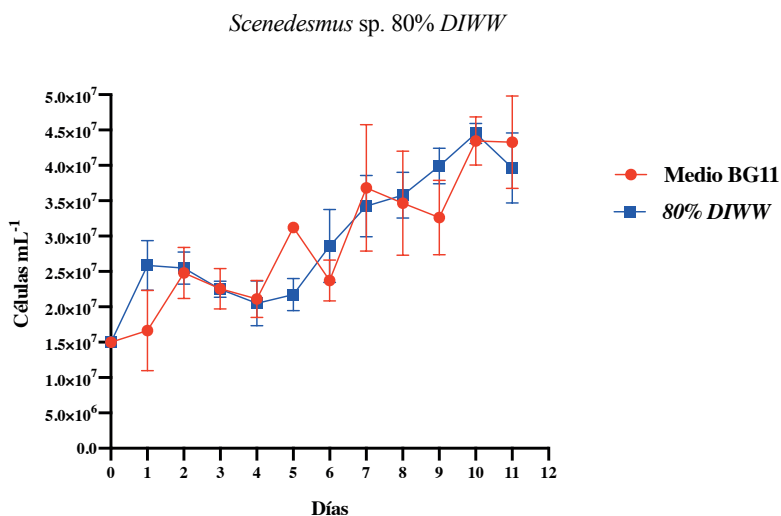


Figura 9. Crecimiento de *Scenedesmus* sp medido como células mL^{-1} . Valores son promedios \pm DS ($n = 3$).

La productividad promedio presentada por los cultivos de *Scenedesmus* sp mantenidos con *DIWW* ($2.5 \pm 0.5 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$) mostró diferencias significativas con respecto a los cultivos mantenidos con el medio estándar de cultivo BG11 ($2.1 \pm 0.8 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$) (test de Tukey $P \leq 0.05$) (Figura 10), los cultivos con el *DIWW* presentaron un productividad promedio mayor (+20.3%) que los cultivos mantenidos en BG11. De igual manera la máxima productividad, $3.4 \pm 0.6 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ se observó en los cultivos con el *DIWW*.

Scenedesmus sp. 80% DIWW

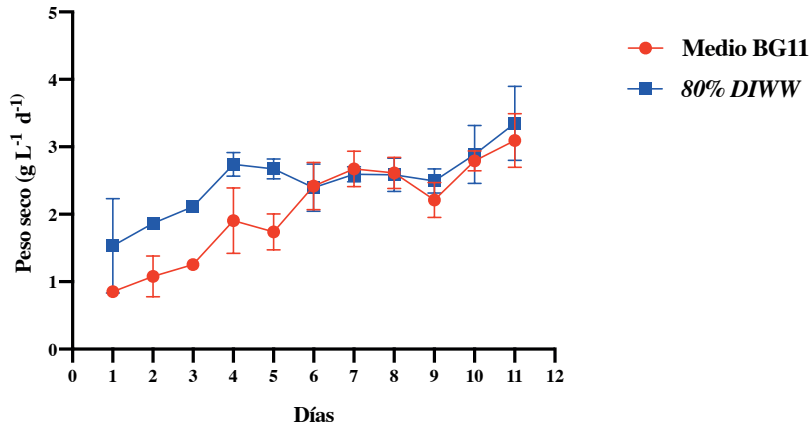


Figura 10. Productividad de *Scenedesmus* sp. Valores son promedios \pm DS (n = 3).

Composición bioquímica de la biomasa

La composición bioquímica de los cultivos mantenidos con el *DIWW* no presentó diferencias significativas comparada con la de los cultivos mantenidos con el medio de cultivo estándar BG11, así, los carbohidratos de biomasa no mostraron sin diferencias significativas entre los cultivos mantenidos con el agua residual ($373.3 \pm 74.4 \text{ mg g}^{-1}$) contrastados con los cultivos con el medio estándar ($394.3 \pm 80.0 \text{ mg g}^{-1}$) (test de Tukey $P \leq 0.05$) (Fig. 11a). La concentración de proteína no mostró diferencias significativas entre los cultivos cultivados con *DIWW* $371.0 \pm 38.3 \text{ mg g}^{-1}$ y los cultivos con el medio BG11: $341.5 \pm 53.1 \text{ mg g}^{-1}$ (test de Tukey $P \leq 0.05$) (Fig. 11b). Similar comportamiento presentó los lípidos de la biomasa, los cultivos con el *DIWW* presentaron una concentración lipídica de $181.7 \pm 24.7 \text{ mg g}^{-1}$, mientras que los cultivos con el BG11 $177.7 \pm 38.8 \text{ mg g}^{-1}$ (test de Tukey $P \leq 0.05$) (Fig. 11c).

Nutrientes en el sobrenadante y la biomasa

Los nutrientes analizados en la biomasa, no presentaron diferencias significativas entre ambos tipos de cultivos, los cultivos con agua residual presentaron una concentración de $41.22 \pm 4.29 \text{ mg g}^{-1}$ y $3.01 \pm 0.36 \text{ mg g}^{-1}$, para nitrógeno total y PO_4^{3-} respectivamente; los cultivos con medio estándar BG11 presentaron concentraciones de nitrógeno total de $38.44 \pm 4.59 \text{ mg g}^{-1}$ y $3.00 \pm 0.25 \text{ mg g}^{-1}$ de PO_4^{3-} (test de Tukey $P \leq 0.05$). La eficiencia de remoción de nitrógeno y fósforo para los cultivos mantenidos en el *DIWW* fue de, 88.41% y 97.07%, respectivamente. Estos datos demuestran la capacidad metabólica de *Scenedesmus* sp. de crecer en *DIWW*, y producir una biomasa con características bioquímicas con interesantes aplicaciones.

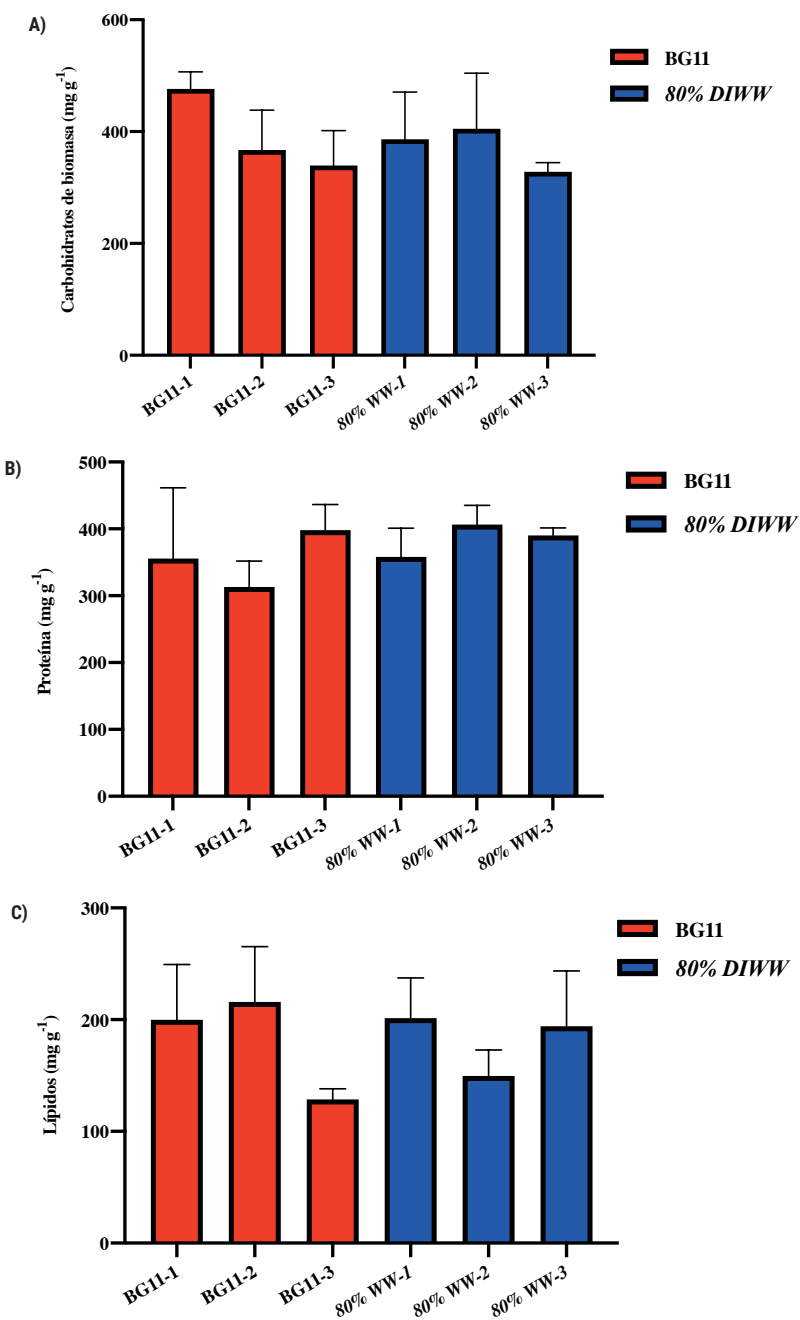


Figura 11. Composición bioquímica de *Scenedesmus* sp. en cultivos con BG11 y con DIWW: A) Carbohidratos de biomasa. B) Concentración proteica. C) Fracción lipídica. Valores son promedios \pm DS (n = 3).

Conclusión

Al final de esta investigación se demostró la viabilidad del cultivo de *Scenedesmus* sp. con las aguas residuales de una industria láctea con una corrección nutricional y de pH. El uso de microalgas representa una alternativa económica al tratamiento convencional de aguas residuales terciarias y secundarias con el valor adicional de la producción de biomasa y obteniendo algunos bioproductos de alto valor agregado (proteínas, carbohidratos, pigmentos), además se obtuvo una alta productividad promedio ($2.5 \pm 0.5 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$) y una concentración lipídica viable ($181.7 \pm 24.7 \text{ mg g}^{-1}$), características que definen una alta producción lipídica importante para la obtención de biocombustibles, con el agregado que se utilizó para el cultivo agua residual agroindustrial (Tabla 7).

Tabla 7. Producción lipídica de diferentes especies oleaginosas.

Especie oleaginosa	Productividad L ha ⁻¹ año ⁻¹
<i>Glycine max</i>	400
<i>Helianthus annuus</i>	800
<i>Brassica napus</i>	1600
<i>Jatropha curcas</i>	2000
<i>Cocos nucifera</i>	2689
<i>Elaeis guineensis</i>	6000
<i>Scenedesmus</i> sp.	166075

13. Referencias Bibliográficas

- Adekunle, F. & Okolie, J. (2015). A review of biochemical process of anaerobic digestion. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 6, 205-212. <https://doi.org/10.4236/abb.2015.63020>
- Albuquerque, J., de la Fuente, C. & Bernal, M. (2012). Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 160, 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.007>
- Allen, M. (1968). Simple conditions for growth of unicellular Blue-green Algae on plates. *Journal of Phycology*, 4(1), 1-4. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1968.tb04667.x>
- Almeida, A., Nafarrate, E., Alvarado, A., Cervantes A., Luevanos, O.R., Oropeza, R., Balagurusamy, N. (2011). Expresión genética en la digestión anaerobia: un paso adelante en la comprensión de las interacciones tróficas de esta biotecnología. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*.
- Alonso, D., Belarbi, E., Fernández, J., Rodríguez, J., Molina, E. (2000). Acyl lipid composition variation related to culture age and nitrogen concentration in continuous culture of the microalga *Phaeodactylum tricornutum*. *Phytochemistry*, 54(5), 461-71. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)00084-4](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)00084-4)

- Álvarez, X. (2016). *Modulación de la producción y caracterización estructural de los exopolisacáridos en cianobacterias diazotróficas, y estudio de su utilización para el tratamiento del digestato líquido de la digestión anaeróbica de efluentes de una procesadora de pescado*. Tesis Doctoral. Universidade de Santiago de Compostela.
- Andrade, C., Vera, A., Cárdenas, C. & Morales, E. (2009). Biomass production of microalga *Scenedesmus* sp. with wastewater from fishery. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 32(2), 126-134.
- Ardila, A., López, Y., Vásquez, M., González, Á. & Barajas, A. (2017). Obtaining lipids and carbohydrates from microalgae via design of selective culture media. *TecnoLógicas*, 20(38), 83-94. <https://doi.org/10.22430/22565337.581>
- Arias, M., Martínez, A. & Cañizares, R. (2013). Biodiesel production from microalgae: cultivation parameters that affect lipid production. *Acta Biol. Colomb.*, 18(1), 43–68.
- Arroyo, L., Martínez, L. & Paredes, M. (2014). *Biomasa microalgal para la generación de biogás*. Casa abierta al tiempo, Universidad Autónoma Metropolitana.
- Aslan, S. & Kapdan, I. (2006). Batch kinetics of nitrogen and phosphorous removal from synthetic wastewater by algae. *Ecological Engineering*, 28(1), 64-70. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.04.003>
- Band, C. (2007). Aislamiento, purificación y mantenimiento de cepas de microalgas. En: Arredondo, B. & Voltolina, D. (Eds.), *Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal* (1-11). México: Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
- Barros, A., Pereira, H., Campos, J., Marques, A., Varela, J. & Silva, J. (2019). Heterotrophy as a tool to overcome the long and costly autotrophic scale-up process for large scale production of microalgae. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50206-z>
- Becker, E. (1988). Micro-algae for human and animal consumption. En: Borowitzka, M. & Borowitzka, L. (eds.). *Micro-Algal Biotechnology*, Cambridge Univ. Press. Cambridge, 1988, 222-256. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(88\)80268-0](https://doi.org/10.1016/0014-5793(88)80268-0)
- Bellou, S., Baeshen, M., Elazzazy, A., Aggeli, D., Sayegh, F. & Aggelis, G. (2014). Microalgal lipids biochemistry and biotechnological perspectives. *Biotechnology Advances*, 32(8), 1476–1493. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2014.10.003>
- Bewicke, D. & Potter, B. (1985). *Chlorella. The Emerald Food*. Ronin Publishing. Berkeley, CA.
- Bhatnagar, A., Chinnasamy, S., Singh, M. & Das, K. (2011). Renewable biomass production by mixotrophic algae in the presence of various carbon sources and wastewaters. *Applied Energy*, 88, 3425–3431. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.064>
- Bligh, E. & Dyer, W. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 37(8):911–917. <https://doi.org/10.1139/o59-099>
- Borowitzka, M. (1988). Vitamins and fine chemicals from microalgae. En: Borowitzka, M. & Borowitzka, L. (eds.). *Micro-Algal Biotechnology*, Cambridge Univ. Press. Cambridge, 1988, 153-196.
- Borowitzka, M. (1999). Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of Biotechnology* 70(1999) 313–321. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(99\)00083-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(99)00083-8)

- Bowyer, J., Howe, J., Levins, R., Groot, H., Fernholz, K., Pepke, E. & Henderson, C. (2018). *Third generation biofuels implications for wood- derived fuels*.
- Brennan, L. & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae- a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renew Sustain Energy Rev.*, 14: 557–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>
- Briones, G. (2012). *Producción de bioetanol a partir de la macroalga Ulva rigida*. Santiago de Chile. Tesis Ing. Biotecnología.
- Bueno, M., Rodríguez, L. & Rodríguez, P. (2016). Análisis de costos de la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables en el sistema eléctrico colombiano. *Ingeniería y Desarrollo*, 34(2), 397-419. . <https://doi.org/10.14482/inde.34.2.7282>
- Campenni, L., Nobre, B., Santos, C., Oliveira, A., Aires-Barros, M., Palavra, A. & Gouveia, L. (2013). Carotenoid and lipid production by the autotrophic microalga *Chlorella protothecoides* under nutritional, salinity, and luminosity stress conditions. *Applied microbiology and biotechnology*, 97(3), 1383-1393. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4570-6>
- Carballo-Cárdenas, E., Tuan, P., Janssen, M. & Wijffels, R. (2003). Vitamin E (α -tocopherol) production by the marine microalgae *Dunaliella tertiolecta* and *Tetraselmis suecica* in batch cultivation. *Biomolecular Engineering*, 20(4-6), 139–147. [https://doi.org/10.1016/S1389-0344\(03\)00040-6](https://doi.org/10.1016/S1389-0344(03)00040-6)
- Carmona, J., Bolívar, D. & Giraldo, L. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Rev Col Cienc Pec Vol. 18*: 1.
- Carmona, J., Hernández, M. & Ramírez, M. (2004). *Algas, glosario ilustrado*, 1° Edición. UNAM- México D.F.
- Castillo, O., Torres-Badajoz, S., Núñez-Colín, C., Peña-Caballero, V., Herrera, C. & Rodríguez, J. (2017). Producción de biodiésel a partir de microalgas: avances y perspectivas biotecnológicas. *Hidrobiológica*, 27(3), 337-352. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2017v27n3/Rodriguez>
- Catalán, G. (2007). El biopetróleo renovable de Alicante, El Mundo. Recuperado de <https://www.elmundo.es/elmundo/2007/05/28/ciencia/1180344922.html>
- Chapman, R. (2013). Algae: the world's most important "plants": an introduction. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(1), 5–12. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9255-9>
- Chaudhary, R. & Khattar, J. (2019). Optimization of culture conditions for lipid production by microalga *Asterarcys quadricellulare* and evaluation of lipids for biodiesel production. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, SP1: 138-144.
- Chen, H., Lao, Y. & Jiang, J. (2011). Effects of salinities on the gene expression of a (NAD⁺)-dependent glycerol-3-phosphate dehydrogenase in *Dunaliella salina*. *Sci. Total Environ.*, 409(7):1291–1297. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.12.038>
- Chen, Z., Wang, L., Qiu, S. & Ge, S. (2018). Determination of microalgal lipid content and fatty acid for biofuel production. *BioMed Research International*, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2018/1503126>
- Chew, K., Yap, J., Show, P., Suan, N., Juan, J., Ling, T., Lee, D. & Chang, J. (2017). Microalgae biorefinery: High value products perspectives. *Bioresource Technology*. 229, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.006>

- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- Chowdhury, H. & Loganathan, B. (2019). Third generation biofuels from microalgae: A review. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 20, 39-44. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.09.003>
- Cobos, M., Castro, J. & Cerdeira, L. (2014). Potencial biotecnológico para la producción sustentable de biodiesel de microalgas oleaginosas aisladas del Río Itaya, Loreto, Perú. *Ecología Aplicada*, 13(2), 169-175. <https://doi.org/10.21704/rea.v13i1-2.467>
- Cobos, M., Paredes, J. & Castro, J. (2016). Inducción de la producción de lípidos totales en microalgas sometidas a estrés nutritivo. *Acta Biológica Colombiana*, 21(1), 17-26. <https://doi.org/10.15446/abc.v21n1.47439>
- Coelho, D., Tundisi, L., Cerqueira, K., Rodrigues, J., Mazzola, P., Tambourgi, E. & Souza, R. (2019). Microalgae: cultivation aspects and bioactive compounds. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 62. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2019180343>
- Cohen, Z. (1986). Products of microalgae. En: *Handbook of microalgae mass culture*. Richmond, A. (ed.). C. R. C. Press. Florida, 1986, pp: 41- 453.
- Collet, P., Hélias, A., Lardon, L., Ras, M., Goy, R. & Steyer, J. (2011). Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. *Bioresource technology*, 102(1), 207-214. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.154>
- Converti, A., Casazza, A., Ortiz, E., Perego, P. & Del Borghi, M. (2009). Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 48(6). 1146-1151.
- Corrales, L., Antolinez, D., Bohórquez J. & Corredor, A. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, 13(23): 55-81. <https://doi.org/10.22490/24629448.1717>
- D'Elia C., Steudler, P. & Corwin, N. (1977). Determination of total nitrogen in aqueous samples using persulfate digestion. *Limnology and Oceanography ASLO*. 22(4), 760-764. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0760>
- Das, P., Aziz, S. & Obbard, J. (2011). Two phase microalgae growth in the open system for enhanced lipid productivity. *Renewable Energy* 36(9), 2524-2528. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.02.002>
- Day, J., Benson, E. & Fleck, R. (1999). In vitro culture and conservation of microalgae: applications for aquaculture, biotechnology and environmental research. *In Vitro Cellular & Developmental Biology. Plant*, 35(2), 127-136. <https://doi.org/10.1007/s11627-999-0022-0>
- De Cataluña, G. (2002). *Centro de Actividad Regional para la Producción Limpia (CAR/PL) Plan de acción para el mediterráneo. Aplicaciones de la biotecnología en la industria.*
- De la Noüe, J. & De Pauw, N. (1988). The potential of microalgal biotechnology: a review of production and uses of microalgae. *Biotechnol. Adv.* 6(4), 725–770. [https://doi.org/10.1016/0734-9750\(88\)91921-0](https://doi.org/10.1016/0734-9750(88)91921-0)
- De Morais, M., Vaz, B., Morais, E. & Costa, J. (2015). Biologically active metabolites synthesized by microalgae. *BioMed Research International*, 2015, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2015/835761>

- Dean, A., Sigee, D., Estrada, B. & Pittman, J. (2010). Using FTIR spectroscopy for rapid determination of lipid accumulation in response to nitrogen limitation in freshwater microalgae. *Bioresour. Technol.*, 101(12), 4499–4507. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.065>
- Del-Campo, J., García-González, M. & Guerrero, M. (2007). Outdoor cultivation of microalgae for carotenoid production: current state and perspectives. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 74(6):1163-1174. <https://doi.org/10.1007/s00253-007-0844-9>
- Demirbas, A. & Demirbas, M. (2010). *Algae Energy: algae as a new source of biodiesel*. Springer, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-050-2>
- Derner, R., Ohse, S., Villela, M., Carvalho, S. & Fett, R. (2006). Microalgas, produtos e aplicações. *Ciência Rural*, 36(6), 1959–1967. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000600050>
- Díaz, K. (2012). Biotecnología de microalgas como fuente de diversos compuestos de interés para la industria farmacéutica y alimentaria. Conferencia: XV Reunión de la COIFFA, Colombia, *Vitae* 19 (Supl. 2), S76- S77.
- Díaz, Y., Fernández, E., Sárvári, I. & Rodríguez, S. (2014). *Hidrólisis química y digestión anaerobia termofílica de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos*. Vol. V, No. 1, pp. 59- 66.
- Dixit, R., Singh, S. & Singh, A. (2019). Effect of nitrogen deficiency on the physiology and biochemical composition of microalga *Scenedesmus rotundus*-MG910488. *Journal of Basic Microbiology*, 60(2), 158-172. <https://doi.org/10.1002/jobm.201900383>
- Drake, H. (2012). *Acetogenesis*. New York: Springer Science & Business Media.
- Dubois, M., Gilles, K., Hamilton, J., Rebers, P. & Smith, F. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350-356.
- Ehimen, E., Sun, Z., Carrington, C., Birch, E. & Eaton-Rye, J. (2011). Anaerobic digestion of microalgae residues resulting from the biodiesel production process. *Applied Energy*, 88(10), 3454-3463. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Elsayed, K., Mohamed, A., Noke, A. & Klöck, G. (2017). Microalgae as an alternative source for biodiesel and biogas production – A mini review. *Nature and Science*, 15(12).
- El-Sheek, M. & Rady, A. (1995). Effect of phosphorus starvation on growth, photosynthesis and some metabolic processes in the unicellular green alga *Chlorella kessleri*. *Phyton* 35, 139-151.
- El-Sheekh, M., Bedaiwy, M., Osman, M. & Ismail, M. (2014). Influence of molasses on growth, biochemical composition and ethanol production of the green algae *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus*. *Journal of Agricultural Engineering and Biotechnology*, 2(2), 20-28. <https://doi.org/10.18005/JAEB0202002>
- Falkowski, P. (1994). The role of phytoplankton photosynthesis in global biogeochemical cycles. *Photosynthesis Research* 39: 235-258. <https://doi.org/10.1007/BF00014586>
- Falkowski, P., Katz, M., Knoll, A., Quigg, A., Raven, J., Schofield, O., Taylor, F. (2004). The evolution of modern eukaryotic phytoplankton. *Science*, 305, 354-360. <https://doi.org/10.1126/science.1095964>
- FAO & CIL. (2015). *Derivados de productos lácteos según el Centro de la Industria Láctea y Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura* (1era ed.). Ecuador: IGM.
- FAO. (2011). *Manual de biogás*. Santiago de Chile.

- Fernández, J. (2014). *Ingeniería de procesos aplicada a la biotecnología de microalgas*. Universidad de Almería.
- Ferrer, Y. & Pérez, H. (2010). Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás. Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de la calidad y el rendimiento ICIDCA. *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 43(1), 9-20.
- Field C., Behrenfeld, M., Randerson, J., Falkowski, P. (1998). Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281(5374): 237-240. <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.237>
- Galarza, O. (2019). Carbohidratos y proteínas en microalgas: potenciales alimentos funcionales. *Brazilian Journal of Food Technology*, 22. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.04319>
- Gallegos-García, M., Celis, L. & Razo-Flores, E. (2010). Competencia por sustrato durante el desarrollo de biomasa sulfatorreductora a partir de un lodo metanogénico en un reactor UASB. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 26(2), 109-117.
- Gardner, R., Peters, P., Peyton, B. & Cooksey, K. (2011). Medium pH and nitrate concentration effects on accumulation of triacylglycerol in two members of the Chlorophyta. *Journal of Applied Phycology* 23(6):1005-1016. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9633-4>
- Garibay, A., Vázquez-Duhalt, R., Sánchez, M., Serrano, L. & Martínez, A. (2009). Biodiesel a partir de microalgas. *BioTecnología*, 13, 38-61
- Gavala, H., Kopsinis, H., Skiadas, I., Stamatelatos, K. & Lyberatos, G. (1999). Treatment of dairy wastewater using an upflow anaerobic sludge blanket reactor. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73(1), 59-63. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0391>
- Gavrilescu M. & Chisti, Y. (2005). Biotechnology -a sustainable alternative for chemical industry. *Journal of Biotechnology Advances*, 23, 471-499. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2005.03.004>
- Gilbert-López, B., Barranco, A., Herrero, M., Cifuentes, A. & Ibáñez, E. (2017). Development of new green processes for the recovery of bioactives from *Phaeodactylum tricornutum*. *Food Research International*, 99, 1056-1065. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.04.022>
- Gilbert-López, B., Mendiola, J., Fontecha, J., van den Broek, L., Sijtsma, L., Cifuentes, A., Herrero, M. & Ibáñez, E. (2015). Downstream processing of *Isochrysis galbana*: a step towards microalgal biorefinery. *Green Chemistry*, 17(9), 4599-4609. <https://doi.org/10.1039/C5GC01256B>
- Giraldo-Calderón, N., Romo-Buchelly, R., Arbeláez-Pérez, A., Echeverri-Hincapié, D. & Atehortúa-Garcés, L. (2018). Microalgae biorefineries: applications and emerging technologies. *Dyna*, 85(205), 219-233. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n205.68780>
- Golueke, C., Oswald, W. & Gotaas, H. (1957). Anaerobic digestion of algae. *Appl Microbiol*, 5(1), 47-55. <https://doi.org/10.1128/am.5.1.47-55.1957>
- Gómez, L. (1997). *Cultivo y aplicación de las microalgas Dunaliella salina y Chlorella vulgaris en Cuba*. Tesis de Doctorado. Servicio de aplicaciones, Universidad de Coruña. La Coruña, España, 1997, 265 pp.
- Gómez, L. (2007). Microalgas: aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista Cubana de Química*, vol. XIX, núm. 2, 2007, pp. 3-20.
- González, A. (2016). *Producción de biogás a partir de microalgas y cianobacterias: efecto de los pretratamientos térmico y alcalino*. Tesis de Maestría.

- Gouveia, L., Neves, C., Sebastião, D., Nobre, B. & Matos, C. (2014). Effect of light on the production of bioelectricity and added-value microalgae biomass in a photosynthetic alga microbial fuel cell. *Bioresource technology*, 154, 171-177. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.049>
- Griffiths, M. & Harrison, S. (2009). Lipid productivity as a key characteristic for choosing algal species for biodiesel production. *Journal of Applied Phycology*, 21(5), 493–507. <https://doi.org/10.1007/s10811-008-9392-7>
- Grossmann, L., Hinrichs, J. & Weiss, J. (2019). Cultivation and downstream processing of microalgae and cyanobacteria to generate protein-based technofunctional food ingredients. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(17), 1–29. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1672137>
- Gunaseelan, V. (1997). Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review. *Biomass Bioenergy*, 13(1-2), 83–114. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)00020-2](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)00020-2)
- Guruvaiah, M., Shah, D. & Shah, E. (2014). Biomass and lipid accumulation of microalgae grown on dairy wastewater as a possible feedstock for biodiesel production. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 3(12).
- Harun, R., Singh, M., Forde, G. & Danquah, M. (2010). Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 1037–1047. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.004>
- Heinrich, J. (2016). *Producción de microalgas con fines alimenticios y energéticos*. Tesis de Maestría.
- Herbert, D., Phipps, P. & Strange, R. (1971). Chemical analysis of microbial cells. *Methods Microbiology*, 5, 209-344. [https://doi.org/10.1016/S0580-9517\(08\)70641-X](https://doi.org/10.1016/S0580-9517(08)70641-X)
- Hernández-Pérez, A. & Labbé, J. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de biología marina y oceanografía*, 49(2), 157-173. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>
- Hernández, P., Santamaría, J. & Rios, L. (2009). *Biodiesel: producción, calidad y caracterización*. Universidad de Antioquia.
- Hong, J., Kim, S., Chang, J., Yi, J., Jeong, J., Kim, S., Kim, S. & Yoon, H. (2012). Isolation and description of a Korean microalga, *Asterarcys quadricellulare* KNUA020, and analysis of its biotechnological potential. *Algae*, 27(3), 197-203. <https://doi.org/10.4490/algae.2012.27.3.197>
- Hsieh, C. & Wu, W. (2009). Cultivation of microalgae for oil production with a cultivation strategy of urea limitation. *Bioresource Technology*, 100(17), 3921-3926. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.019>
- Ibañez, E. & Cifuentes, A. (2013). Benefits of using algae as natural sources of functional ingredients. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(4), 703–709. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6023>
- Ichsan, Hadiyanto, H., & Hendroko, R. (2014). Integrated Biogas-microalgae from waste waters as the potential biorefinery sources in Indonesia. *Energy Procedia*, 47, 143–148. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.207>
- Illman, A., Scragg, A. & Shales, S. (2000). Increase in Chlorella strains calorific values when grown in low nitrogen medium. *Enzyme Microb. Tech.* 27(8), 631–635. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(00\)00266-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(00)00266-0)

- International Committee for Standardization Haematology: selected method for visual platelet counting. (1988). *Labmedica*, 4, 25-36.
- Ji, M., Yun, H., Park, Y., Kabra, A., Oh, I. & Choi, J. (2015). Mixotrophic cultivation of a microalga *Scenedesmus obliquus* in municipal wastewater supplemented with food wastewater and flue gas CO₂ for biomass production. *J Environ Manage.*, 159, 115–120. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.05.037>
- Kamalanathan, M., Chaisutyakorn, P., Gleadow, R. & Beardall, J. (2018). A comparison of photoautotrophic, heterotrophic, and mixotrophic growth for biomass production by the green algae *Scenedesmus* sp. (Chlorophyceae). *Phycologia*, 57(3), 309-317. <https://doi.org/10.2216/17-82.1>
- Khozin- Goldberg, I. & Cohen, Z. (2006). The effect of phosphate starvation on the lipid and fatty acid composition of the fresh water eustigmatophyte *Monodus subterraneus*. *Phytochemistry*, 67(7), 696-701. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.01.010>
- Klok, A., Lamers, P., Martens, D., Draaisma, R. & Wijffels, R. (2014). Edible oils from microalgae: insights in TAG accumulation. *Trends in Biotechnology*, 32(10), 521-528. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2014.07.004>
- Kushwaha J., Srivastava, V. & Mall, I. (2011). An overview of various technologies for the treatment of dairy wastewaters. *Critical Review in Food Science and Nutrition*. 51, 442-452. <https://doi.org/10.1080/10408391003663879>
- Larkum A.W.D. (2006). The evolution of chlorophylls and photosynthesis. In: Grimm B, Porra RJ, Rudiger W, Scheer H (eds) *Chlorophylls and bacteriochlorophylls*. Springer, Berlin, pp 261-282. https://doi.org/10.1007/1-4020-4516-6_18
- Lee, O., Kim, A., Seong, D., Lee, C., Jung, Y., Lee, J. & Lee, E. (2013). Chemo-enzymatic saccharification and bioethanol fermentation of lipid-extracted residual biomass of the microalga, *Dunaliella tertiolecta*. *Bioresource technology*, 132, 197-201. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.01.007>
- Lee, R. (2008). *Phycology*. (4ta. ed.), 1-23. Colorado State University, EE. UU.
- Lee, Y. (1997). Commercial production of microalgae in the Asia-Pacific rim. *Journal of Applied Phycology*, 9(5), 403–411. <https://doi.org/10.1023/A:1007900423275>
- Li, Q., Du, W. & Liu, D. (2008). Perspectives of microbial oils for biodiesel production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 80(5), 749–756. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1625-9>
- Li, Y., Han, D., Sommerfeld, M. & Hu, Q. (2011). Photosynthetic carbon partitioning and lipid production in the oleaginous microalga *Pseudochlorococcum* sp. (Chlorophyceae) under nitrogen-limited conditions. *Bioresour Technol*, 102(1), 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.036>
- López, J. (2008). Geopolítica del petróleo y crisis mundial. *Dyna*, 75(156), noviembre, 2008.
- Lorenzo, Y. & Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I ICIDCA. *Sobre los Derivados de la caña de azúcar*, vol. XXXIX, núm. 1, 2005, pp. 35-48.
- Lowry, O., Rosebrough, N., Farr, A. & Randall, R. (1951). Protein measurement with the folin phenol reagent. *The Journal of Biological Chemistry*, 193(1), 265-275. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)52451-6](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)52451-6)

- Mandal, S. & Mallick, N. (2009). Microalga *Scenedesmus obliquus* as a potential source for biodiesel production. *Applied microbiology and biotechnology*, 84(2), 281-291. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-1935-6>
- Marlina, E. (2007). *Kandungan gizi lumpur susu PT Indomilk laboratorium nutrisi ternak ruminansia dan kimia makanan ternak*. Sumdang: Fakultas Peternakan Universitas Padjajaran.
- Marsh, J. & Weinstein, D. (1966). Simple charring method for determination of lipids. *J Lipid Res*, 7(4):574–576. [https://doi.org/10.1016/S0022-2275\(20\)39274-9](https://doi.org/10.1016/S0022-2275(20)39274-9)
- Martínez, L. (2009). *Eliminación de CO₂ con microalgas autóctonas*. Universidad de León, España. Tesis doctoral.
- Masojídek, J., Koblížek, M. & Torzillo, G. (2013). Photosynthesis in microalgae. En: *Handbook of microalgal culture: Applied Phycology and Biotechnology*. Richmond, A. & Hu, Q. (eds.) pp 21-36. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch2>
- Massana, R., Terrado, R., Forn, I., Lovejoy, C., Pedros-Alió, C. (2006). Distribution and abundance of uncultured heterotrophic flagellates in the world oceans. *Environ. Microbiol.*, 8(9), 1515-1522. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2006.01042.x>
- Massé, D. & Droste, R. (2000). Comprehensive model of anaerobic digestion of swine manure slurry in a sequencing batch reactor. *Water Research*, 34(12), 3087–3106. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00064-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00064-6)
- Mata, T., Martins, A. & Caetano, N. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217–232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Matthew, T., Zhou, W., Rupprecht, J., Lim, L., Thomas-Hall, S., Doebbe, A., Kruse, O., Hankamer, B., Marx, U., Smith, S. & Schenk, P. (2009). The metabolome of *Chlamydomonas reinhardtii* following induction of anaerobic H₂ production by sulfur depletion. *Journal of Biological Chemistry*, 284(35), 23415–23425. <https://doi.org/10.1074/jbc.M109.003541>
- Meeting, F. (1996). Biodiversity and application of microalgae. *Journal of Industrial Microbiology*, 17(5-6), 477–489. <https://doi.org/10.1007/BF01574779>
- Méndez, L., Albarracín, I., Cravero, M. & Salomón, R. (2010). Crecimiento de *Scenedesmus quadricauda* en efluentes cloacales de la ciudad de Trelew, Chubut, Argentina.
- Mercado, E. (2016). *Cultivo de la microalga Scenedesmus obliquus var. dimorphus (TURPIN) para la obtención de biomasa y lípidos*. Tesis de Maestría. Perú.
- Miao, X. & Wu, Q. (2006). Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. *Bioresource Technology*, 97(6), 841-846. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.04.008>
- Milledge, J. (2011). Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 10(1), 31-41. <https://doi.org/10.1007/s11157-010-9214-7>
- Ministerio de Industrias y Productividad. (2014). La industria lechera busca generar mayor valor agregado para sumarse al Cambio de la Matriz Productiva. Recuperado de <http://www.industrias.gob.ec/bp-072-la-industria-lechera-busca-generar-mayor-valor-agregado-para-sumarse-al-cambio-de-la-matriz-productiva/>

- Mirón, A., Garcia, M., Gómez, A., Camacho, F., Grima, E. & Chisti, Y. (2003). Shear stress tolerance and biochemical characterization of *Phaeodactylum tricornutum* in quasi steady-state continuous culture in outdoor photobioreactors. *Biochemical Engineering Journal*, 16(3), 287-297. [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(03\)00072-X](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(03)00072-X)
- Montero, Y., Gallo, A., Gómez, L., Álvarez, I., Sabina, L., Támbara, Y., Álvarez, A., Alfonso, M. & Ramírez, L. (2012). Productividad de lípidos y composición de ácidos grasos de cinco especies de microalgas. *Investigación y Saberes*, Vol. I No. 2 (2012): 37-43.
- Montuelle, B., Coillard, J. & Le Hy, J. (1992). A combined anaerobic- aerobic process for the co-treatment of effluents from a piggery and a cheese factory. *J. Agric. Eng. Res.*, 51: 91-100. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(92\)80028-Q](https://doi.org/10.1016/0021-8634(92)80028-Q)
- Moreno, B. & López, A. (2008). Las energías renovables: perspectivas e impacto sobre el empleo en Asturias. *Revista de Estudios Regionales*, núm. 83, septiembre-diciembre, 2008, pp. 177-195. Málaga, España.
- Morone, P. & Cottoni, L. (2016). Biofuels: technology, economics, and policy issues. En: Capítulo 4: *Handbook of biofuels production*, (2ª edición). 61-83.
- Mussgnug, J., Klassen, V., Schlüter, A. & Kruse, O. (2010). Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept. *Journal of biotechnology*, 150(1), 51-56. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2010.07.030>
- Nickelsen, K. (2007). Otto Warburg's first approach to photosynthesis. *Photosynthesis Research*, 92(1), 109-120. <https://doi.org/10.1007/s11120-007-9163-3>
- Nobre, B., Villalobos, F., Barragan, B., Oliveira, A., Batista, A., Marques, P., Mendes, R., Sovová, H., Palavra, A. & Gouveia, L. (2013). A biorefinery from *Nannochloropsis* sp. microalga-extraction of oils and pigments. Production of biohydrogen from the leftover biomass. *Bioresource technology*, 135, 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.084>
- Núñez, L. (2017). *Modelamiento y control de proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y/o aguas residuales*. Tesis de Maestría.
- Nurmayani, S., Sugiarti, Y. & Putra, R. (2016). Utilization of industrial dairy waste as microalgae cultivation medium: a potential study for sustainable energy resources. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 128(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/128/1/012033>
- Odjadjare, E., Mutanda, T., Chen, Y. & Olaniran, A. (2018). Evaluation of pre-chlorinated wastewater effluent for microalgal cultivation and biodiesel production. *Water*, 10, 977. <https://doi.org/10.3390/w10080977>
- Oliveira, O., Ganesella, S., Silva, V., Mata, T. & Caetano, N. (2017). Lipid and carbohydrate profile of a microalga isolated from wastewater. *Energy Procedia*, 136, 468-473. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.305>
- Ortiz, M., Cortés, C., Sánchez, J., Padilla, J. & Otero, A. (2012). Evaluación del crecimiento de la microalga *Chlorella sorokiniana* en diferentes medios de cultivo en condiciones autotróficas y mixotróficas. *Orinoquía*, 16, N°. 1, 2012, págs. 11-20. <https://doi.org/10.22579/20112629.224>
- Oswald, W. & Golueke, C. (1960). Biological transformation of solar energy. *Adv Appl Microbiol.*, 2, 223-62. [https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(08\)70127-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(08)70127-8)

- Oswald, W. (1988). Microalgae and Wastewater Treatment. En: Borowitzka, M. & Borowitzka, L. (Eds.), *Micro-algal Biotechnology*, Cambridge Univ. Press, págs. 357–394.
- Oswald, W., Benemann, J. & Koopman, B. (1977). Production of biomass from freshwater aquatic systems, concepts of large- scale bioconversion systems using microalgae. In *Proc. Fuels Biomass Symp.*, Univ. Illinois, Champaign: 59- 81.
- Pacheco, R., Ferreira, A., Pinto, T., Nobre, B., Loureiro, D., Moura, P., Gouveia, L. & Silva, C. (2015). The production of pigments & hydrogen through a *Spirogyra* sp. *biorefinery*. *Energy Conversion and Management*, 89, 789-797. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.040>
- Paniagua-Michel, J. & Sasson, A. (1995). Moléculas de microalgas de importancia económica. En: Alveal, K., Ferrario, M., Oliveira, E. & Sar, E. (Eds.), *Manual de Métodos Ficológicos*, Concepción. Chile.
- Papanikolaou, S., Chevalot, I., Komaitis, M. & Marc, I. (2002). Single cell oil production by *Yarrowia lipolytica* growing on an industrial derivative of animal fat in batch cultures. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 58(3), 308–312. <https://doi.org/10.1007/s00253-001-0897-0>
- Parés, R. & Juárez, A. (1997). *Bioquímica de los microorganismos*. Barcelona España: Reverte S.A; 1997.
- Passeggi, M., López, I. & Borzacconi, L. (2009). Integrated anaerobic treatment of dairy industrial wastewater and sludge. *Water Sci. Technol.*, 59(3): 501–506. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.010>
- Pastén, C. (2012). Chile, energía y desarrollo. *Obras y proyectos*, (11), 28-39. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132012000100003>
- Patnaik, R. & Mallick, N. (2015). Utilization of *Scenedesmus obliquus* biomass as feedstock for biodiesel and other industrially important co-products: An integrated paradigm for microalgal biorefinery. *Algal Research*, 12, 328-336. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.09.009>
- Pérez, M. & Quishpi, J. (2014). *Evaluación cuantitativa de la producción de biodiesel de microalgas de lagunas de tratamiento de agua residual*. Universidad de Cuenca.
- Pérez, M., Quishpi, J., Pauta, G., León, F., Cisneros, J., Pinos, V. & Alvarado, A. (2018). Comparación de las eficiencias de recuperación de lípidos de las microalgas *Chlorella* y *Scenedesmus* obtenidas con diferentes disolventes. *Maskana*, 9(2), 27-34. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.02.04>
- Pérez, R. (2009). *Eliminación de nutrientes para el tratamiento biológico de agua residual usando un sistema inmovilizado microalga- bacteria en crecimiento autotrófico, heterotrófico y mixotrófico*. Tesis de Maestría. CIBNor, México.
- Perez-Garcia, O. & Bashan, Y. (2015). Microalgal heterotrophic and mixotrophic culturing for bio-refining: from metabolic routes to techno-economics. In Prokop, A., Bajpai, R. & Zappi, M. (Eds) *Algal Biorefineries*, 61-161. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20200-6_3
- Pérez-López, P., González-García, S., Ulloa, R., Sineiro, J., Feijoo, G. & Moreira, M. (2014). Life cycle assessment of the production of bioactive compounds from *Tetraselmis suecica* at pilot scale. *Journal of Cleaner Production*, 64, 323–331. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.028>

- Picazo, R., Gonzalez, J. & Manzaner, M. (2011). Bioresources for third-generation biofuels. *Biofuel's Engineering Process Technology*.
- Pire, M., Hernández, J., Carrasquero, S. & Díaz, A. (2014). Efecto de un tratamiento anaeróbico en la tratabilidad de aguas residuales de tenerías. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 29(2), 41-50
- Plaza, M., Herrero, M., Cifuentes, A., Ibanez, E. (2009). Innovative natural functional ingredients from microalgae. *J. Agric. Food Chem.*, 57: 7159–7170. <https://doi.org/10.1021/jf901070g>
- Prateek, U. & Sonu, A. (2016). A review of Third-generation biofuels from microalgae. *Journal of Biofuels.*, 7(1). pp. 14-19. <https://doi.org/10.5958/0976-4763.2016.00003.9>
- Praveenkumar, R., Shameera, K., Mahalakshmi, G., Akbarsha, M. & Thajuddin, N. (2012). Influence of nutrient deprivations on lipid accumulation in a dominant indigenous microalga *Chlorella* sp., BUM11008: Evaluation for biodiesel production. *Biomass and Bioenergy*, 37, 60-66. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.035>
- Priyadarshani, I. & Rath, B. (2012). Commercial and industrial applications of micro algae a review, *Journal of Algal Biomass Utilization*, 3(4), 89–100.
- Rai, M. & Gupta, S. (2016) Growth and lipid production from *Scenedesmus* sp. under mixotrophic condition for bioenergy application. In: *Proceeding of the first international conference on recent advances in bioenergy research*. Kumar, S., Khanal, S. & Yadav, Y. (eds.) Springer Nature. India. 159–167. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2773-1_12
- Raja, H., Ferrer, A. & Shearer, C. (2009). Freshwater ascomycetes: a new genus, *Ocala scalariformis* gen. et sp. nov, and two new species, *Ayria nubispora* sp. nov., and *Rivulicola cygnea* sp. nov. *Fungal Diversity*, 34, 79-86.
- Ramasamy, E., Gajalakshmi, S., Sanjeevi, R., Jithesh, M. & Abbasi, S. (2004). Feasibility studies on the treatment of dairy wastewaters with upflow anaerobic sludge blanket reactors. *Bioresource Technology*, 93(2), 209–212. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.11.001>
- Ramírez, I., Vela, N. & Rincón, J. (2012). Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y Ciencia*, 20(55), 62-70.
- Ramos, J. (2014). *Producción de biogás a partir de biomasa de la microalga Scenedesmus sp. procedente de diferentes procesos*. Tesis Doctoral.
- Razo, C., Ludeña, C., Saucedo, A., Astete, S., Hepp, J. & Vildósola, A. (2007). Producción de biomasa para biocombustibles líquidos: el potencial de América Latina y el Caribe. *CEPAL- Serie desarrollo productivo* N° 181. Chile.
- Reitan, K., Rainuzzo, J. & Olsen, Y. (1994). Effect of nutrient limitation on fatty acid and lipid content of marine microalgae. *Journal of Phycology* 30(6), 972–979. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1994.00972.x>
- Richmond, A. (1990). Large scale microalgal culture and applications. En: *Progress in phycological research*, vol 7, (Round, F. & Chapman D., eds.), pp. 239-320. Biopress Ltd., Bristol.
- Richmond, A. (2004). *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. Blackwell Science Ltd.

- Rodríguez, J., Torres, M., da Silva, D. & Villanueva, J. (2014). Efecto del estrés inducido por deficiencia de sales nutritivas en un sistema de Cultivo Raceway AWL de las microalgas *Chlorella vulgaris* y *Scenedesmus dimorphus* en la obtención de aceite. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer. *Goiânia*, 10(19), 796-810.
- Roessler, P. (1988). Effects of silicon deficiency on lipid composition and metabolism in the diatom *Cyclotella cryptica*. *Journal of Phycology*, 24(3), 394–400. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1988.tb04482.x>
- Rosales, A., Rodríguez, C. & Ballen, M. (2018). Pollutant remotion and growth of *Scenedesmus* sp. on wastewater from Tannery. A comparison between free and immobilized cells. *Ing. Cienc.*, 14(28), 11–34. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.14.28.1>
- Rouco, M. (2011). *Mecanismos genéticos y estrategias adaptativas de productores primarios (microalgas y cianobacterias) en un escenario de cambio global*. Tesis doctoral. Madrid- España.
- Sacristán, M., Luna, V., Cadena, E. & Alva, A. (2014). Producción de biodiésel a partir de microalgas y una cianobacteria cultivadas en diferentes calidades de agua. *Agrociencia*, 48, 271-284.
- Salas, G., Benavides, A., Zermeño, A., Orta, A. & Sánchez, F. (2015). Evaluación de microalgas para la producción de biomasa económicamente útil usando aguas producidas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, n ol.6, n.spe12, pp.2423-2435.
- Samson, R. & LeDuy, A. (1982). Biogas production from anaerobic digestion of *Spirulina maxima* algal biomass. *Biotechnol Bioeng*, 24, 1919–1924. <https://doi.org/10.1002/bit.260240822>
- Samson, R. & LeDuy, A. (1986). Detailed study of anaerobic digestion of *Spirulina maxima* algal biomass. *Biotechnology and Bioengineering*, 28, 1014-1023. <https://doi.org/10.1002/bit.260280712>
- Sánchez-Hernández, E. & Travieso-Cordoba, L. (1993). Anaerobic digestion of *Chlorella vulgaris* for energy production. *Resour. Conserv. Recycl.*, 9, 127–132. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(93\)90037-G](https://doi.org/10.1016/0921-3449(93)90037-G)
- Santos, A., González, Y. & Martín, C. (2014). *Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas*.
- Santos, D., Rossi, S. & Valdez, A. (2016). Energía verde a partir de microalgas. Biogás como estrategia para una biorefinería sustentable. *Antecedentes, retos y fundamentos prácticos*. Editorial Académica Española.
- Scheer, H (ed) (1991) *Chlorophylls*. CRC Press, Boca Raton, 1257 pp.
- Schliep, M., Cavigliasso, G., Quinnell, R.G., Stranger, R., Larkum, A.W.D. (2013). Formyl group modification of chlorophyll a: a major evolutionary mechanism in oxygenic photosynthesis. *Plant, Cell, Environ.*, 36, 521-527. <https://doi.org/10.1111/pce.12000>
- Sheath, R. G. (1997). *Algae, an introduction to Phycology*. C. van den Hoek, D. G. Mann, H. M. Jahns. *Journal of the North American Benthological Society*, 16(4). <https://doi.org/10.2307/1468159>
- Sialve, B., Bernet, N. & Bernard, O. (2009). Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnology advances*, 27(4), 409-416. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.03.001>

- Sipaúba- Tavares, L., Tedesque, M. & Scardoeli-Truzzi, B. (2019). Evaluation of the effects of sugarcane molasses as a carbon source for *Ankistrodesmus gracilis* and *Haematococcus pluvialis* (Chlorophyceae). *Brazilian Journal of Biology*. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.216820>
- Smee, D., Bailey, K., Wong, M., Okeefe, B., Gustafson, K., Mishin, V. & Gubareva, L. (2008). Treatment of influenza A (H1N1) virus infections in mice and ferrets with cyanovirin-N. *Antiviral Research*, 80(3), 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.antiviral.2008.06.003>
- Soeder, C. & Hegewald, E. (1989). *Scenedesmus*. In: Borowitzka, M. & Borowitzka, L. (Eds), *Microalgal biotechnology* (pp. 59-84). Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Soeder, C. & Pabst, W. (1975). Production, properties, preclinical and clinical testing of *Scenedesmus* 276-3a. The PAG Compendium (New York: World Mark Press Ltd.,) C-2, 2113.
- Solé-Bundó, M., Garfí, M. & Ferrer, I. (2018). Mejora de la digestión anaerobia de microalgas mediante codigestión y pretratamientos. *Aguasresiduales.info*, 16 Maig 2018, p. 1-4
- Solovchenko, A., Khozin, I., Cohen, Z. & Merzlyak, M. (2009). Carotenoid-to-chlorophyll ratio as a proxy for assay of total fatty acids and arachidonic acid content in the green microalga *Parietochloris incisa*. *J. Appl. Phycol.*, 21, 361–366. <https://doi.org/10.1007/s10811-008-9377-6>
- Spolaore, P., Joannis, C., Duran, E. & Isambert, A. (2006). Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101(2), 87–96. <https://doi.org/10.1263/jbb.101.87>
- Stewart, C. (1991). The rumen bacteria. In: Jouany, J. *Rumen microbial metabolism and ruminant digestion*. INRA editions, Paris, France, 1991; 15-26.
- Suthers, I. & Rissik, D. (Eds.). (2009). Plankton: A guide to their ecology and monitoring for water quality. *Journal of Fish Biology*, 76(7). https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2010.02604_1.x
- Tandon H., Cescas, M. & Tyner, E. (1968). An acid-free vanadate-molybdate reagent for the determination of total phosphorus in soils. *Soil Science Society of America Journal Abstract*. 32(1), 48-51. <https://doi.org/10.2136/sssaj1968.03615995003200010012x>
- Tejeda, L., Henao, D., Alvear, M. & Castillo, C. (2015). Caracterización y perfil lipídico de aceites de microalgas. *Facultad de Ingeniería*, 24(39), 43-54. <https://doi.org/10.19053/01211129.3550>
- Tiwari, A. & Marella, T. (2020). Algal biomass: potential renewable feedstock for biofuel production. In: *Substrate analysis for effective biofuels production*. Srivastava, N., Srivastava, M., Mishra, P., Gupta, V., (eds.). Springer Nature, Singapore, 2020; 1-32. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9607-7_1
- Torres, D., Cáceres, S., Roa, A., Suárez, J. & Urbina, N. (2017). Utilización de microalgas de la división Chlorophyta en el tratamiento biológico de drenajes ácidos de minas de carbón. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 19(2), 95–104. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v19n2.70429>
- Vanthoor-Koopmans, M., Wijffels, R., Barbosa, M. & Eppink, M. (2013). Biorefinery of microalgae for food and fuel. *Bioresource technology*, 135, 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.135>

- Vourch, M., Balannec, B., Chaufer, B. & Dorange, G. (2008). Treatment of dairy industry wastewater by reverse osmosis for water reuse. *Desalination*, 219(1–3), 190–202. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.05.013>
- Wang, M., Keeley, R., Zalivina, N., Halfhide, T., Scott, K., Zhang, Q., van der Steen, P. & Ergas, S. (2018). Advances in algal-prokaryotic wastewater treatment: a review of nitrogen transformations, reactor configurations and molecular tools. *J. Environ. Manag.*, 217, 845–857. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.021>
- Wang, X., Fosse, H., Li, K., Chauton, M., Vadstein, O. & Reitan, K. (2019). Influence of nitrogen limitation on lipid accumulation and EPA and DHA content in four marine microalgae for possible use in aquafeed. *Front. Mar. Sci.*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00095>
- Warburg, O. (1919). Über die Geschwindigkeit der photochemischen Kohlensäurezersetzung in lebenden Zellen. *Biochem. Zeit*, 100: 230–270.
- Ward, A., Hobbs, P., Holliman, P., Jones, D. (2008). Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresour. Technol.*, 99(17). 7928-7940. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>
- Widjaja, A., Chien, C. & Ju, Y. (2009). Study of increasing lipid production from fresh water microalgae *Chlorella vulgaris*. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 40(1):13-20. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2008.07.007>
- Xin, L., Ying, H., Ke, G. & Xue S. (2010). Effects of different nitrogen and phosphorus concentrations on the growth, nutrient uptake, and lipid accumulation of a freshwater microalga *Scenedesmus* sp. *Bioresource Technology*, 101(14), 5494-5500. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.016>
- Xiong, W., Gao, C., Yan, D., Wu, C. & Wu, Q. (2010). Double CO₂ fixation in photosynthesis-fermentation model enhances algal lipid synthesis for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 101(7), 2287–2293. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.041>
- Yeh, K. & Chang, J. (2012). Effects of cultivation conditions and media composition on cell growth and lipid productivity of indigenous microalga *Chlorella vulgaris* ESP-31. *Bioresour Technol.*, 105, 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.103>
- Yeh, K., Chen, C. & Chang, J. (2012). pH-stat photoheterotrophic cultivation of indigenous *Chlorella vulgaris* ESP-31 for biomass and lipid production using acetic acid as the carbon source. *Biochem Eng J.*, 64, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2012.02.006>
- Yen, H. & Brune, D. (2007). Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane. *Bioresour. Technol.*, 98, 130–134. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.010>
- Zhang, Y., Chen, H., He, C. & Wang, Q. (2013). Nitrogen starvation induced oxidative stress in an oil-producing green alga *Chlorella sorokiniana* C3. *PLoS ONE*, 8(7), e69225. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069225>
- Zhu, C. & Lee, Y. (1997). Determination of biomass dry weight of marine microalgae. *Journal of Applied Phycology*, 9(2), 189-194. <https://doi.org/10.1023/A:1007914806640>

Valorización energética de la tusa del maíz (*Zea mays*) en la provincia de Los Ríos y Guayas, Ecuador

José Alfonso Martillo Aseffe¹, René Lesme Jaén²
y Luis Oscar Oliva Ruiz²

¹Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Avenida Carlos Julio Arosemena, km 1 1/2, Guayaquil, Ecuador.

²Centro de Estudios de Energía y Refrigeración, Universidad de Oriente, Patricio Lumumba S/N, Santiago de Cuba, Cuba.

1. Introducción

En el Ecuador la cosecha de maíz constituye un rico patrimonio de tradiciones agrícolas y alimenticias, la producción nacional de maíz seco supera el millón de toneladas métricas (ton), siendo la provincia de Los Ríos, la región de mayor producción (casi el 56% de toda la producción nacional) y su rendimiento (4,56 ton de maíz/ha por cosecha) se encuentra por encima del valor medio nacional (3.68 ton/ha por cosecha), 11.5% por debajo del mayor rendimiento del país, obtenido en la provincia de Guayas (5.15 ton/ha por cosecha) (Tabla 1).

Tabla 1. Superficie sembrada de maíz y rendimiento por hectáreas (Boletín, 2017).

Regiones	Área plantada (ha)	Área cosechada (ha)	Producción de maíz (ton)	Rendimiento del maíz (ton/ha)
Total Nacional	361346	330058	1215192	3.68
Los Ríos	156565	150185	684142	4.56
Guayas	49927	46288	238391	5.15
Manabí	72606	58797	129266	2.20
Loja	38792	33068	101339	3.06
Otros	43456	41720	62054	1.49

Tradicionalmente los residuos de la cosecha de maíz (hojas y tallos) se dejan en las áreas de cosechas o se utilizan como alimento de ganado, ya sea en estado verde o seco y al igual que con la cascarilla del arroz se han realizado estudios sobre la valorización nutritiva de los mismos para evaluar la producción de carne y la rentabilidad en la alimentación de ovinos. (Sánchez Laiño, 2014).

En el caso de la tusa del maíz, su uso como combustible energético no está documentado y parte de estos materiales son dejados en el campo o quemados a cielo abierto provocando impactos notables en los medios receptores, contaminación del agua, el suelo, el aire, contribuyendo al cambio climático, afectando los ecosistemas y a la salud humana. (Peláez, 2015).

Cuando un residuo no se puede reutilizar como materia prima para obtener alimento animal u otros productos, como es el caso de la tusa, la opción más viable es su aprovechamiento para la obtención de energía, que es lo que se conoce como valorización energética, la cual incluye también los procesos que permiten aprovechar los residuos, para lo cual es necesario estimar sus volúmenes, características técnicas y su potencial energético. (Guía para la valorización energética de los residuos, 2010, Milena Yepes, 2008).

De esta forma las comunidades rurales pueden ser entonces energéticamente auto suficientes en un alto grado, a partir del uso racional de los residuos y, al mismo tiempo, revitalizar las economías rurales, proveyendo energía en forma independiente y segura.

En el presente trabajo se realiza una valorización energética del potencial energético de la tusa (Giga Joule/hectárea o kWh/ha) en la provincia de Los Ríos y Guayas a través de la evaluación experimental de los coeficientes, volúmenes de residuos generados, la caracterización de la tusa como combustible y el comportamiento energético de los sistemas de gasificación de la tusa y motores de combustión interna para la generación de electricidad.

2. Materiales y métodos

El maíz es una planta de fácil desarrollo y de producción anual, en el caso de Ecuador, se realizan dos cosechas al año. En el caso de la región de Guayas y Los Ríos en Ecuador las variedades de semillas más utilizadas son: H-551; H-553; H-601 y H-602, las cuales se diferencian por su rendimiento, la altura de la planta, el tamaño y el diámetro de la tusa fundamentalmente. (Atlas Bioenergético, 2014).

Durante el proceso de cosecha y separación de granos de maíz se obtienen residuos tales como tusas, hojas, raíces y tallos. Las hojas (hojas de la planta y la mazorca), los tallos y las raíces se generan básicamente en el campo mientras que las tusas) residuos que queda después del desgrane de la mazorca) y sus hojas se generan en las unidades de proceso (Figura 1).

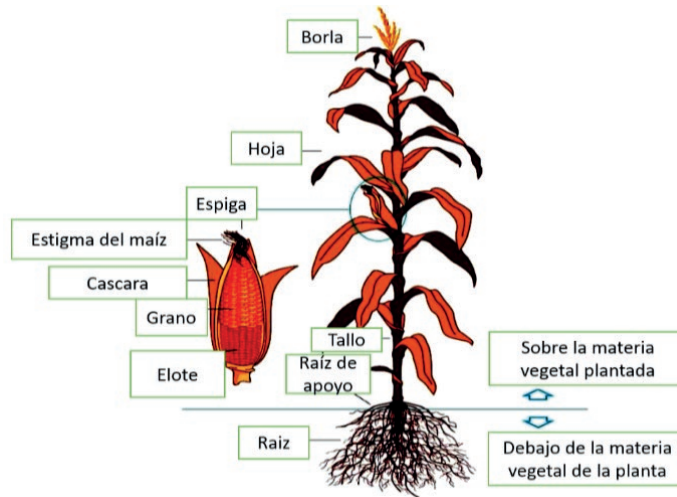


Figura 1. Partes de la planta y la mazorca de maíz (Arun, 2016).

El número de muestra para realizar el estudio se determinó tomando en cuenta las consideraciones reportadas en (Webster, 2000), para poblaciones desconocidas. En total fueron analizadas 1510 distribuidas como se muestra en la Tabla 2.

Para el cálculo de los coeficientes fueron consideradas muestras de diferentes plantas de maíz distribuidas en una hectárea (Población 900 plantas) (Tabla 2):

Tabla 2. Número de muestras por hectárea.

Regiones	Cantones	Número de muestra
Los Ríos	Ventanas, Vinces, Palenque, Babahoyo, Mocache	1100
Guayas	Pedro Carbo, Nobol	400
Total		1510

Se realizó el pesaje de cada una de las partes que conforman la planta, relacionando el peso de cada parte de la planta con la masa del grano de maíz obtenido después del desgranado de la mazorca (Ecuación 1).

$$C_R = \frac{\text{Peso del residuo}}{\text{Peso del maíz}} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Las Figuras 2 a, b, c, d, e, f, g, h muestran la secuencia de las mediciones realizadas para la determinación del coeficiente de residuos.



Figura 2. Planta de maíz. A) Planta con raíz, tallo, hoja y mazorca. B) Planta sin mazorca. C) Planta sin hojas y mazorca. D) Mazorca. E) Mazorca sin hojas. F) Granos. G) Tusas. H) Raíz.

Caracterización de los residuos de tusa de maíz. Poder calorífico

Las muestras de tusa (Humedad 10 %) objeto de estudios fueron tomadas de ambas provincias, Los Ríos y Guayas y determinada su composición elemental, inmediata y poder calorífico bajo en los laboratorios del Centro de Excelencia y Generación Distribuida (NEST) de la Universidad Federal de Itajubá, Brasil en la Tabla 2 se presentan los resultados y las Normas utilizadas.

La humedad de la biomasa en base de trabajo fue determinada con una balanza de humedad y pesaje modelo MAC (obtenida de forma automática por el equipo) cuya precisión de lectura del 0,1 %. El análisis aproximado fue realizado por una balanza termo gravimétrica LECO (TGA 701), temperatura de trabajo desde 100°C hasta 1000°C y resolución de 0.0001 gramos. El análisis inmediato fue realizado con un analizador Perkin Elmer

(CHNSO, Model 2400), precisión $\leq 0.2\%$. El valor calórico fue obtenido mediante un calorímetro Labcontrol modelo C2000. Este equipo posibilita la obtención del poder calorífico superior (LHV_s), dado que las muestras no sufrieron ningún tratamiento previo, el resultado es considerado en base de trabajo y el valor calorífico inferior (LHV_b) en base de trabajo fue determinado a partir de la ecuación 2. (Cortez, 2008).

$$LHV_b = LHV_s - \chi[W_t + 0.09H_s(1 - W_t)] \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

LHV_s : Poder calorífico superior en base de trabajo, kJ/kg.

χ : Calor latente del agua (2310 kJ/kg a 25°C).

W_t : Humedad de la biomasa en base de trabajo, %.

H_s : Contenido de hidrógeno en el combustible en base seca, % másico.

Potencial energético de los residuos de tusa de maíz

Para la estimación del potencial energético se utilizó la siguiente expresión:

$$PE_t = CR_t \chi R_{mha} \chi PCI_{bt} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Dónde:

PE_t . Potencial energético de la tusa por hectárea, GJ/ha.

CR_t . Coeficiente de residuos de tusa, Kgr/Kgp.

R_{mha} . Rendimiento de maíz por hectárea, tm/ha.

PCI_{bt} . Poder calorífico bajo de la tusa, MJ/kg.

Para establecer una relación de equivalencia entre el potencial energético de la tusa y el de otros combustibles, se utilizaron los datos de valor calorífico bajo reportados en la Tabla 3.

Tabla 3. Poder calorífico bajo de diferentes combustibles.

Combustible	Poder calorífico bajo, MJ/kg	Referencias
Petróleo Crudo	40.14	Nogueira, 2005
GLP	46.46	Nogueira, 2005
Gasolina	44.00	Heywood, 1988
Keroseno	43.02	Faires, 1986
Gas Natural	44,53	Faires, 1986
Madera	21,31	Kung-Yuh, 2012
Carbón Mineral	30.92	Faires, 1986
Biogás	25,94	Baptista, 2001

Comportamiento energético de los sistemas de gasificación de la tusa

Los estudios paramétricos de la gasificación de la tusa se realizaron en el laboratorio de termodinámica de la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo (ESPOCH). El esquema de la instalación se presenta en la Figura 3.

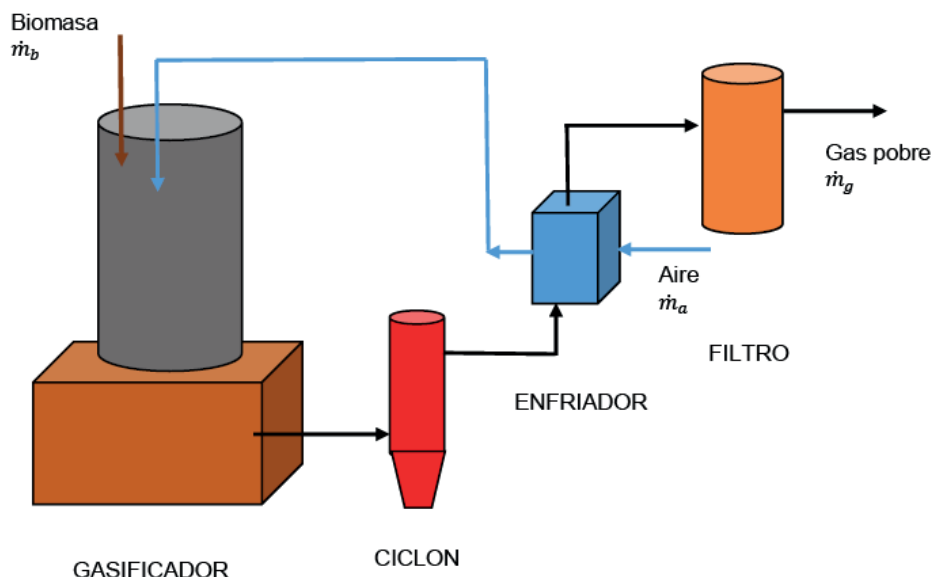


Figura 3. Esquema de la instalación de laboratorio.

Se tomaron muestras de gases después del filtro, muestras que son almacenadas y sometidas a un análisis cromatográfico (Norma ASTM D 1945-03 del 2010) en el laboratorio de análisis instrumental del Departamento de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional en la ciudad de Quito.

Valorización energética de la tusa

Para la valorización del potencial energético de la tusa de maíz se concibió un escenario donde una parte de la energía del gas producto de la gasificación de biomasa debe ser utilizado para sustituir el consumo de gasolina del motor de la desgranadora de maíz (Motor Vanguardia de 18 hp - Modelo DGM-70) y la energía eléctrica suministrada a un grupo electrógeno para entregar a la red nacional (Figura 4). Las desgranadora de maíz tiene un consumo de gasolina de 1.4 litros/ton de maíz seco, que equivale a 216.79 MJ/ha (0.06MWh/ha) (Martillo, 2019).

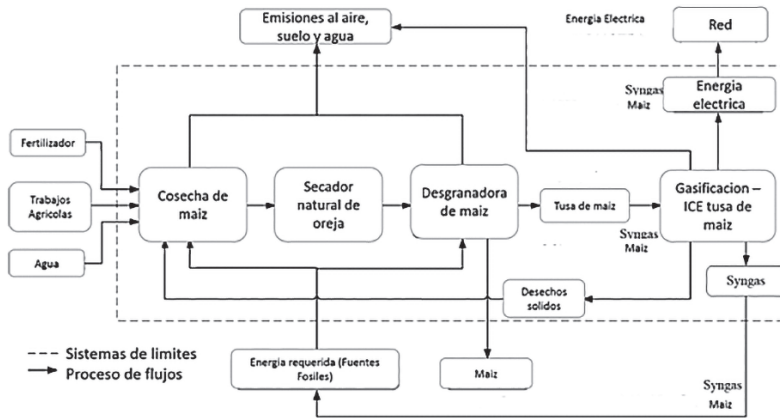


Figura 4. Escenario de producción de maíz por con aprovechamiento energético de la tusa.

3. Resultados y discusión

Coefficientes de residuos de la cosecha de maíz

Los coeficientes de residuos promedios derivados de la producción de maíz, obtenidos experimentalmente a través de la ecuación 1 y siguiendo la secuencia representada en la Figura 2 se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes de residuos de la cosecha de maíz en la provincia de Los Ríos y Guayas.

Provincias	Cantones	Recintos	Coeficientes de Residuos (kg/kg) ^(*)					Total
			Tallos	Raíz	Hojas ¹	Hojas ²	Tusas	
Los Ríos	Palenque	Pisi	0.330	0.182	0.316	0.008	0.176	1.012
Los Ríos	Palenque	Revesa	0.280	0.080	0.248	0.022	0.120	0.750
Los Ríos	Vince	Vince	1.031	0.452	0.535	0.051	0.211	2.280
Los Ríos	Ventanas	Pijio	1.231	0.260	0.393	0.029	0.220	2,133
Los Ríos	Babahoyo	Cirhuelo	0.990	0.150	0.532	0.028	0.210	1.910
Guayas	Pedro Carbo	Nueva Esperanza	0.899	0.723	0.420	0.045	0.158	2.245
Guayas	Nobol	Artillería	0.432	0.089	0.562	0.041	0.204	1.328
Promedio			0,741	0.277	0.429	0.032	0.186	1.665

(*)Corresponde a la relación de kg de residuos/ kg de producto (maíz). 1. Hojas de la planta, 2. Hojas de la mazorca.

En el caso de la tusa se obtuvo un valor promedio de 0,186 kilogramos de tusas por kilogramo de maíz seco cosechado, teniendo en cuenta que el rendimiento de maíz promedio en las regiones de Los Ríos y Guayas es de 4.86 ton/ha se pueden obtener 0.9 ton de tusas por hectárea.

Caracterización de los residuos de tusa de maíz

Se determinó la composición elemental del la tusa en base seca y libre de cenizas, el % de cenizas volátiles y carbón fijo y el poder calorífico inferior.

Tabla 5. Características de las tusas.

Análisis Elemental (% másico), base seca y libre de cenizas.		
Elementos	Valores	Normas
Carbono (C)	48,50	
Hidrógeno (H)	5,64	
Oxígeno (O)	45,46	ASTM D 5373-08
Nitrógeno (N)	0,40	
Azufre (S)	0,01	
Análisis Inmediato (%másico)		
Cenizas	1,73	ASTM D 3175
Volátiles	79,36	ASTM D 3174
Carbón fijo	17,14	ASTM D 3172
Humedad	1,77	ASTM D 3173
Valor calórico inferior (base de trabajo) (MJ/kg)	17,40	

Potencial energético de la tusa

Considerando el coeficiente promedio de residuos de tusa (0.186 kgr/kgp) (Tabla 4), un rendimiento de maíz promedio por hectárea de 4.86 ton/ha en la provincia de Los Ríos y Guayas (Tabla 1) y un poder calorífico bajo promedio de 17,40 MJ/kg (Tabla 5), podemos estimar un potencial energético (Ecuación 3) de 15.72 GJ/ha por cosecha (4.37 MWh/ ha por cosecha) como energía primaria de carácter renovable, teniendo en cuenta que 3600 kJ/ kWh (Faires, 1986).

Para establecer una relación de equivalencia entre el potencial energético de los residuos de tusa, la Figura 3 muestra el potencial energético equivalente de una hectárea de tusa y la cantidad másica de combustible equivalente por unidad de área por cosecha, para los combustibles comúnmente utilizado en el área rural, atendiendo a su poder calorífico reportado en la Tabla 6.

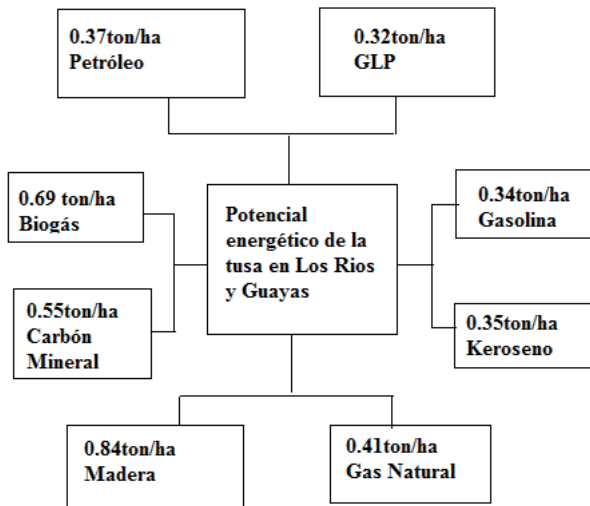


Figura 3. Potencial energético equivalente de una hectárea de residuos de tusa de maíz.

Comportamiento energético de los sistemas de gasificación de la tusa.

Los resultados de los análisis de gases producto de la gasificación de la tusa se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Composición en volumen del gas de la gasificación de la tusa en base húmeda.

No	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂	C ₂ H ₆	H ₂ O	ρ _r	M _{wg}	LHV _g
1	19,05	4,18	24,58	0,52	10,27	39,82	0,99	0,60	0,98	28,33	6,35
2	29,96	1,21	18,21	0,62	12,33	35,89	1,13	0,65	0,85	24,50	8,37
3	24,52	2,29	58,63	3,47	1,88	8,19	0,09	0,95	0,79	22,72	3,39
4	30,66	1,97	16,57	0,79	8,34	40,15	0,70	0,81	0,88	25,48	6,72
5	8,50	1,88	36,55	3,08	1,61	46,65	0,25	1,49	1,15	33,01	1,66

Leyenda: pr: Densidad relativa del gas, Mwg. Peso molecular del gas (kg/kmol), LHVg. Valor calórico bajo del gas (MJ/Nm³).

Con la composición en volumen de los gases se realizó un balance de masa en el gasificador para determinar la producción específica de gas, como resultado se obtuvo, que se producen como promedio 1.91 Nm³/kg. (Martillo, 2019).

Valorización energética del potencial de la tusa

La valorización del potencial energético de la tusa de maíz por hectárea (15.72 GJ/ha por cosecha, 43.67 MW-h/ha por cosecha) se realizó considerando el valor promedio de

la producción específica de gas (1.91 Nm³/kg), un valor calórico del gas de 6.00 MJ/Nm³, el coeficiente de residuos de tusa (0.186 kg de tusas/kg de maíz), producción de maíz por hectárea (4.855 ton/ha). Con estos valores se puede determinar un potencial energético del gas de 10348.72 MJ/ha (2.87 MW-h/ha). Esto representa el 65.7 % del potencial energético de la tusa.

Una parte de la energía del gas producto de la gasificación de biomasa debe ser suministrado al motor de la desgranadora de maíz 259.26 MJ/ha (0.072 MWh/ha), 1.65 % del potencial energético de la tusa. Considerando que la eficiencia promedio de un motor a gas es del 21.0% (Martillo, 2019), entonces es necesario suministrar al motor 1234.57 MJ/ha (0.34 MW-h), 7.85% del potencial energético de la tusa.

Después de satisfacer el consumo energético del motor de la cosechadora la energía contenida en el gas 9114.15MJ/ha (2.53MWh/ha), 57.89% del potencial energético puede ser suministrada a un grupo electrógeno para entregar electricidad a la red nacional. Teniendo en cuenta la eficiencia del motor (21%) es posible entregar a la red 1913.97MJ/ha (0.53MWh/ha) por cosecha, valor que representa el 12.12% del potencial energético de la tusa.

La Figura 4 corresponde a un diagrama de Sankey, en el cual se muestra la distribución de la densidad energética derivada de la producción de residuos de tusa de maíz y su aprovechamiento energético mediante un sistema de gasificación y un motor de combustión interna.

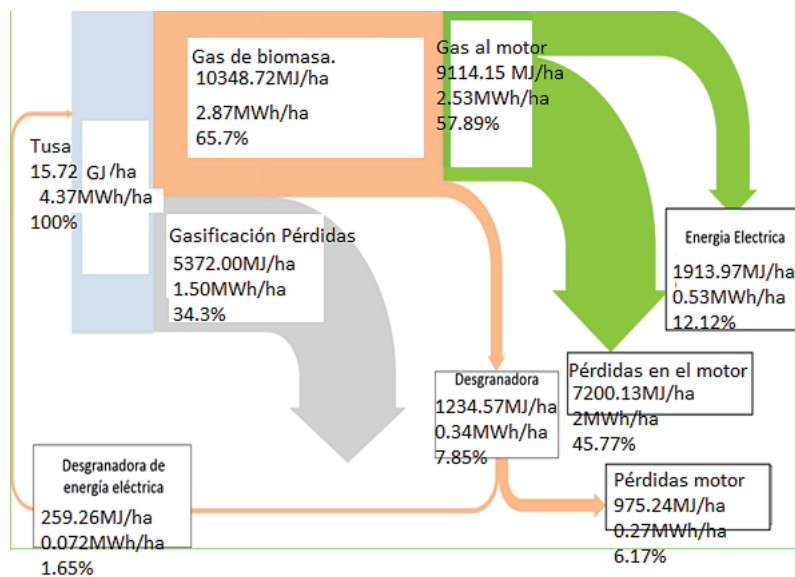


Figura 4. Diagrama de Sankey de aprovechamiento energético de la tusa.

4. Conclusiones

- En las provincias de Los Ríos y Guayas, Ecuador, la cosecha de maíz genera 0,741 ton de tallos/ton de maíz, 0,277 ton de raíces/ton de maíz, 0,461 ton de hojas/ton de maíz y 0,186 ton de tusa/ton de maíz, para un total de 1,992 ton de residuos/ton de maíz. Excepto la tusa los restantes residuos tiene un destino útil, ya sea como abono o alimento animal, por lo que en éste sentido la tusa constituye un recurso bioenergético de importancia para el país.
- El potencial energético de la tusa en las provincias de Los Ríos y Guayas es de 15,72 GJ/ha por cosecha, equivalente a 0,37 toneladas de petróleo crudo, 0,32 toneladas de GLP, 0,34 toneladas de gasolina, 0,35 toneladas de keroseno, 0,41 toneladas de gas natural, 0,84 toneladas de madera, 0,35 toneladas de carbón mineral y 0,69 toneladas de biogás.
- Utilizando la de tusa de maíz en tecnologías de gasificación y generación de electricidad con motores de combustión interna, es posible, después de la sustitución de la gasolina por gas de gasificación en el motor de la desgranadora de maíz, obtener un potencial energético de 1913.9 MJ/ha por cosecha y un índice de generación eléctrica equivalente de 0.53 MWh/ha.

5. Referencias bibliográficas

- Arun K.M, Ramanan Venkata. (2016). Comparative studies on gasification of corn cob, Casuarina wood and coconut shell in a fixed bed gasifier. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. No.8, 544-552
- Atlas Bioenergético de Ecuador. (2014). Instituto Nacional de Pre inversión. ESIN Consultora S.A. Primera Edición 150 Páginas.
- Baptista Dos Santos Tânia Mara. Balanço energético e adequação do uso de biodigestores em galpões de frangos de corte. Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias/ UNESP – Jaboticabal, para obtenção do Título de Doutor em Zootecnia - Produção Animal. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de ciências agrárias e veterinárias. Campus de Jaboticaba– SP, Fevereiro - 2001
- Cortes, L.A., Olivares, E., Silva, E.E. (2008). *Biomassa para Energia*, Editorial UNICAMP. Brasil, 736 p. ISBN 78-85-268-0783-9.
- Faires, Virgil. M. (1986). Termodinámica. Edición Revolucionaria. 807p. ISBN 968-438-029-1.
- Guía para la valorización energética de los residuos. Fundación de Energía de la Comunidad de Madrid. Disponible en: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-de-valorizacion-energetica-de-residuos-fenercom-2010.pdf>. Madrid 2010.
- Heywood Jonh B. (1988). *Internal Combustión Engines Fundamentals*. McGraw Hill, Ing. New York ISBN 0-07-02637-X.
- Kung-Yuh Chiang, Kuang-Li Chien, Cheng-Han Lu. (2012). Characterization and comparison of biomass produced from various sources: Suggestions for selection of pretreatment technologies in biomass-to-energy. *Applied Energy*, 100, 164–171

- Martillo Aseffe J.A, Lesme Jaén R, Martínez González A, Oliva Ruiz L. O, Orozco Cantos L.S, Silva Lora E.E. (2019). Estudios paramétricos de la gasificación de la tusa de maíz en gasificadores downdraft". *Revista Tecnología Química*, 39, 2 ISSN 2224 6185.
- Martillo Aseffe J. A, Lesme Jaén R, Oliva Ruiz L. O, Martínez González A, Silva Lora E.E. (2019). Análisis de ciclo de vida del aprovechamiento energético de los residuos (tusa) de la cosecha de maíz (*Zea mays*) en la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Revista Tecnología Química*, 39(3). ISSN 2224 6185.
- Milena Yepes Sandra, Montoya Naranjo Lina Johana y Orozco Sánchez Fernando. (2008). Valorización de residuos agroindustriales – frutas –en Medellín y el sur del Valle del Aburrá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía. Medellín*, 61(1), 4422-4431.
- Nogueira, L.A.H., Lora, E.E.S. (2003). *Dendroenergía: Fundamentos e Aplicações*. 2.ed. – Rio de Janeiro: Interciência, 199p. ISBN: 8571930775.
- Peláez Samaniego Manuel Raúl, Espinoza Abad Juan Leonardo. (2015). Energías renovables en el Ecuador. Situación actual, tendencias y perspectivas. Universidad de Cuenca, Ecuador, 1ra edición. ISBN: 978-9978-14-317-9. 410p. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/286755978_Estado_de_la_energia_geotermica_en_Ecuador.
- Sánchez Laiño Adolfo; Torres Navarrete Emma; Estupiñan Véliz Kleber; Vargas Burgos Julio; Sánchez Torres Jeniffer; Sánchez Vélez, Nadia. Valoración nutritiva del rastrojo de *Zea mays* y *Oryza sativa* para la alimentación de ovinos en el trópico ecuatoriano. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 4 No. 3, Pp 235-249.
- Webster A. L. (2000). *Estadística aplicada a los negocios y a la economía*. 3ra Edición. Editorial Irwin McGraw-Hill. ISBN: 958-41-0072-6. 651p.



PROGRAMA
IBEROAMERICANO

CYTED

CIENCIA Y TECNOLOGÍA PARA EL DESARROLLO

