



Guía de Cultivos energéticos de Latinoamérica

RED IBEROMASA

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

Índice

	Pag.
Eucalipto en Ecuador Borja Velázquez-Martí; Juan Gaibor-Chávez	1
Producción de biomasa del fuste de <i>Eucalyptus benthamii</i> Maiden & Cambage, <i>Eucalyptus dunnii</i> Maiden y <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden en plantaciones de corta rotación en Uruguay Fernando Resquin; Cecilia Rachid; Leonidas Carrasco-Letelier;	15
Bambú en Perú Mary Flor Césare; José Luis Titto; Raphael Paucar; José Luis Calle; Héctor Gonzales Mora	57
Caña de azúcar en Paraguay Lisa María Lovera-Rivas ¹ ; Hugo Ariel Ramirez-Mereles ²	89

Eucalipto en Ecuador

Borja Velázquez-Martí¹; Juan Gaibor-Chavez²

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

²) Centro de Investigación de Ambiente, Departamento de Investigación, Universidad Estatal de Bolívar, Laguacoto II, Km 1y 1/2 vía San Simón, Guaranda, Ecuador

Correponging Author: Velázquez-Martí B. borvemar@dmta.upv.es

1. Descripción

Características generales

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



Figura 1. Plantación de Eucaliptos



Figura 2. Corteza del Eucalipto

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

Crece con bastante rapidez.

Sistema radicular

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

Tallo

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

Hojas

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



Figura 3. Hojas lanceoladas de Eucalipto

Flores

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



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

Frutos

Los frutos tienen forma de cápsula de unos 2,5 cm de longitud dividida en tres o cuatro sectores con un gran número de semillas negras de 1 o 2 mm.

2. Distribución

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

3. Exigencias del cultivo

Temperatura mínima y máxima, rango óptimo

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

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

Fotoperiodo

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

Necesidades de agua

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

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

Necesidades nutricionales

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

Exigencias de suelo

El eucalipto se puede cultivar en cualquier tipo de textura, tanto arcillosa, limosa como arenosa. El factor más importante para el adecuado desarrollo es el pH, debiendo estar comprendido entre 5,5 y 6,5.

4. Estadios fenológicos

Tabla 1. Épocas de los distintos estadios

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

5. Principales enfermedades y plagas

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

Insectos

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

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

Gorgojo Gonipterus scutellatus: Este uno de los insectos que hasta ahora ha causado mayores daños a las plantaciones de eucaliptos. Su presencia se ha observado en Nueva Zelandia, y sur de África. Ataca con preferencia *Eucalyptus*

maideni, *E. viminalis*, *E. globulus*, *E. camaldulensis*, *E. robusta*, *E. citriodora* y *E. smithii*. En cambio otras especies como *E. saligna*, *E. cladocalyx*, *E. melliodora*, *E. crebra*, *E. fastigata*, *E. paniculata* y *E. maculata* parecen ser resistentes. Existe una considerable literatura sobre los métodos de combatir este insecto. Cabe destacar que puede ser controlado biológicamente con el himenóptero, *Anaphoides nitens*, el cual es de dispersión rápida.

Ericoccus coriaceus: Este insecto coccidio se coloca sobre las ramas y sobre las nerviaciones principales de las hojas. Segrega un líquido en el que se desarrolla un hongo de color negro característico. Sin embargo, hoy esta plaga puede controlarse fácilmente mediante lucha biológica mediante el coccinélido *Rhizobius ventralis*, la mosca *Pseudoleucopis benefica* y el lepidóptero *Stathmopoda melanchra*.

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

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

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

Hongos

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

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

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

6. Técnicas de cultivo

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

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

Tecnología de preparación del suelo

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

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

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

Marco de plantación

El marco de plantación aconsejado es de 3×3 metros (1.111 plantas por hectárea) o 3×4 metros (833 plantas por hectárea). En cuanto a la época de plantación, se recomienda la primavera.

Tecnología de fertilización

Sólo será necesario realizar abonado los primeros años de crecimiento.

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

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

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

Tecnología de propagación y plantación

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

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

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

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

Las semillas en las macetas deben ser humedecidas regularmente bien con agua pulverizada o por sistema de goteo, especialmente cuando las semillas empiecen a germinar, siendo conveniente hacerlo a diario o en días alternos para mantener el medio de cultivo uniformemente hidratado.

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

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

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

tierra alrededor de las raíces. Se riega la zona con agua abundante para ayudar a que los eucaliptos se asienten en la tierra

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

Sistema de riego

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

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

Poda

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

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

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

Tecnología de cosecha

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

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

Tala

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

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

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

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

Desembosque

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

Astillado y transporte

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

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

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

7. Estudio económico

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

Tabla 2. Precios unitarios del estudio económico

Materias primas	
Plantones	0,5 \$/unidad
NPK 8-28-7 con boro y magnesio	0,45 \$/kg
Maquinaria	
Retroexcavadora	40,20 \$/h
Taladora apiladora	50,10 \$/h
Tractor autocargador	35,48 \$/h
Astilladora transportable	75,95 \$/h
Contenedor de transporte	\$/h
Mano de obra	
Jornal	10 \$/h

Precio de mercado

El precio de mercado se ha obtenido de Argus Media (2019), que indica que el precio de astilla en Brasil es de 129,5 \$/t.

Contabilización de costes

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

Tabla 3. Costes de plantación

Concepto	Unidad	Medición	Coste unitario	Coste
Abertura de pozos	h/ha	0,45	40,20	18,09
NPK 8-28-7 con boro y magnesio	kg/ha	33,32	0,45	14,994
Plántulas	ud/kg	833	0,50	416,5

Tabla 4. Costes de poda

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

Para el cálculo de los costes de cosecha se ha considerado una productividad de la taladora apiladora de 45 t/h (Ghaffariyan y Brown, 2011), una productividad del tractor autocargador de 4 t/h (Cremer y Velázquez-Martí, 2007), una productividad de 40 t/h en la asitilladora (Ghaffariyan y Brown, 2011).

Tabla 5. Costes de cosecha

Concepto	Unidad	Medición	Coste unitario	Coste
Taladora apiladora	h/ha	0,45	50,10	22,55
Tractor autocargador	h/ha	5	35,48	177,40
Astillado	h/ha	0,5	79,85	40,00
Transporte	h/ha			

Tabla 6. Resumen de costes

Concepto	Medición	Unidad
Plantación	449,58	\$/ha
Poda	300	\$/ha
Cosecha y transporte	239,87	\$/ha

El coste total de la plantación se estima en 989,45 \$/ha. El ingreso se estima en 129,5 \$/t, que equivale a 2590 \$/ha. Por tanto el flujo de caja a los tres años, que es cuando se considera el turno, es de 1600,5 \$/ha, 80 \$/t.

8. Características energéticas de la madera

La madera del eucalipto posee las siguientes características.

Tabla 7. Características energéticas del eucalipto

Poder calorífico	18,9 ± 0,5 MJ/kg	(Gominho et al., 2012)
Densidad a granel con P15	1,78 t/m ³	(Kumar et al., 2011)
Porcentaje de cenizas	0,6 ± 0,2 %	(Gominho et al., 2012)
Porcentaje de Volátiles	81,1 ± 0,6 %	(Gominho et al., 2012)
Porcentaje de carbono fijo	18,3 ± 0,6 %	(Gominho et al., 2012)
Contenido en C	46,8 ± 0,6 %	(Kumar et al., 2011)
Contenido de H	5,8 ± 0,1 %	(Gominho et al., 2012)
Contenido en N	0,16 ± 0,05 %	(Kumar et al., 2011)
Contenido en S	0,18 ± 0,06 %	
Contenido en Cl	0,04 ± 0,01 %	(Gominho et al., 2012)
Punto de fusibilidad de cenizas	°C	

9. Conclusiones

En las plantaciones energéticas de eucalipto se pueden obtener producciones entre 16 y 21 t/ha de materia seca. El precio de mercado se sitúa alrededor de 129,5 \$/t. El coste de la producción se sitúa en 989,45 \$/ha, obteniendo un beneficio de 80 \$/t o 1600,5 \$/ha.

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

Referencias

Argus Media (2019) <https://www.argusmedia.com/es/bioenergy>

Carrero, O., Stape, J. L., Allen, L., Arrevillaga, M. C., & Ladeira, M. (2018). Productivity gains from weed control and fertilization of short-rotation Eucalyptus plantations in the Venezuelan Western Llanos. *Forest Ecology and Management*, 430, 566–575. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.07.050>

Cremer T., Velázquez-Martí B. 2007. Evaluation of two harvesting systems for the supply chips in Norway spruce forest affected by bark beetles. *Croatian Journal of Forest Engineering* 28(2): 145-155. <https://hrcak.srce.hr/18249>

du Toit, B. (2008). Effects of site management on growth, biomass partitioning and light use efficiency in a young stand of *Eucalyptus grandis* in South Africa. *Forest Ecology and Management*, 255(7), 2324–2336. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.037>

Ghaffariyan, M., & Brown, M. (2011). Efficiency of Biomass Harvesting in Poor Quality Stands of *Eucalyptus* in Western Australia. 34th Council on Forest Engineering, June 12-15, 2011, Quebec City (Quebec).

Gominho, J., Lourenço, A., Miranda, I., & Pereira, H. (2012). Chemical and fuel properties of stumps biomass from *Eucalyptus globulus* plantations. *Industrial Crops and Products*, 39, 12–16. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.01.026>

Kumar, R., Pandey, K. K., Chandrashekar, N., & Mohan, S. (2011). Study of age and height wise variability on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus* hybrid, *Acacia auriculaeformis* and *Casuarina equisetifolia*. *Biomass and Bioenergy*, 35(3), 1339–1344. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.031>

Velázquez-Martí, B. (2017) Aprovechamiento de la biomasa para uso energético. Ed. Reverté, 840 pp.

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

Fernando Resquin; Cecilia Rachid; Leonidas Carrasco-Letelier;

¹⁾ Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Ruta 5 km. 386 - Tacuarembó, Uruguay

Correponging Author: Resquin F: fresquin@inia.org.uy

1. Introducción

A partir de la crisis del petróleo en los años 70 la valorización de la biomasa ha cobrado cada vez mayor importancia en el escenario energético mundial (Eloy et al., 2014). A lo largo de ese periodo ha ocurrido una fuerte transición de los usos de la biomasa, desde los de bajo nivel tecnológico (por ejemplo, leña para la cocción de alimentos) a usos más modernos como la generación de electricidad, calor y distintos tipos de combustibles. Uno de los factores más relevantes para su adopción, independientemente de la tecnología utilizada, ha sido la reducción de los costos de aprovechamiento y transporte (Macedo, 2003). Por esta razón, las líneas de investigación a nivel mundial han estado orientadas al desarrollo de procesos más eficientes de conversión en el uso de la madera y a la mejora en las técnicas de manejo y cosecha de cultivos energéticos. Esto se origina por el hecho de que en las últimas décadas el consumo de energía es cada vez mayor y que se espera, de acuerdo a la Agencia Internacional de la Energía, que la demanda aumente un 36% para el año 2035 con respecto al consumo en el año 2008 (IEA 2010). No obstante, actualmente el 40% del consumo mundial de energía se basa en los combustibles de origen fósil. En este escenario la mejor forma de asegurar el suministro para satisfacer esa demanda es el desarrollo de diferentes alternativas energéticas que mejor se adaptan a cada región (Pleguezuelo et al., 2014). Una de las opciones que permiten reducir la dependencia del petróleo, y al mismo tiempo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, son las energías derivadas de materiales lignocelulósicos, y en particular las de origen forestal (Eufrade

Junior et al., 2016). Este tipo de materiales además de ser renovables tienen diversos tipos de aplicaciones energéticas industriales (Hinchee et al., 2011).

La información que surge en los últimos años muestra que existen una serie de procesos denominados por su sigla en inglés BTL (biomasa a líquido) o BTG (biomasa a gas) que podrían llegar a ser usados a nivel comercial en los próximos años (Yaman, 2004; Swain et al., 2011, Bensaid et al., 2012, Yang et al., 2014, IRENA 2016). En términos generales, los cultivos energéticos ocupan una proporción menor en el total de la energía producida a partir de biomasa pero la tendencia es a un aumento en las próximas década (Sims et al., 2006). De acuerdo con este autor, la energía primaria proveniente de la biomasa representa un 13,4% del total de la energía generada a nivel mundial.

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

Uruguay no ha sido la excepción a la expansión de este género, y desde la promulgación de la ley forestal del año 1989 la superficie plantada con varias especies de eucalipto ha crecido en forma sostenida, ocupando una superficie actual próxima a las 700.000 hectárea (MGAP-DGF, 2017). Por otro lado, se ha impulsado la producción de combustibles líquidos para substituir las importaciones de petróleo (aunque en porcentajes de poca magnitud) a través de un marco legal que básicamente promueve la producción de etanol y biodiesel de segunda generación. En Uruguay, por tanto, los sistemas SRFC con especies de *Eucalyptus* a priori son una alternativa para la producción de biomasa con destino a la generación de distintos tipos de combustibles. Existe abundante evidencia experimental y empírica que indica cuales son las especies, sitios y prácticas silviculturales que permiten obtener altos niveles de crecimiento en sistemas de producción de celulosa y madera sólida (Balmelli y Resquin, 2006). Las especies de mayor productividad son *E. grandis*, *E. dunnii*, *E. benthamii*, *E. maidenii*, y *E. globulus*, pero también están siendo cada vez más utilizados los híbridos interespecíficos. Estas especies se caracterizan por tener una densidad de la madera relativamente alta (Tuset et al., 2008; Turvey, 2015) y ser tolerantes a la competencia (Jacobs 1995, Tomé y Verwijst, 1996), lo cual las hace aptas para la producción de biomasa en turnos cortos. Para esto es necesario determinar cómo es la respuesta de esas especies frente a este tipo de sistemas de producción.

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

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

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

2. Materiales y Métodos

Área de estudio

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

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

50 cm de profundidad, textura arenosa, estructura debil, bajo contenido de materia orgánica, pendientes de 2%–3%, medio a bajo riesgo de sequía, drenaje imperfecto, permeabilidad moderada a lenta y buena capacidad de exploración de raíces (MGAP, 1976). El clima corresponde al tipo subtropical templado, con una temperatura media anual de 18°C, y unas temperaturas medias de 12°C y 24°C para el mes más frío y más cálido, respectivamente. El rango medio de precipitación anual se ubica entre 1300 y 1400 litros m² (Castaño et al., 2011).

Diseño experimental

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

En Tacuarembó la preparación del suelo, previo a la plantación, consistió en un subsolado de 40 cm de profundidad y el paso posterior de una grada excéntrica. En el sitio de Paysandú se realizaron dos aplicaciones sucesivas de una grada excéntrica a 30 cm de profundidad más una acaballadora. La plantación se realizó manualmente y se aplicó una fertilización de asiento de 150 kg ha⁻¹ de 18/46/0 (N, P, K) y 180 kg ha⁻¹ de 14/30/12 (N, P, K) mas 6% S, 0,2% B y 0,3% Zn, en los sitios de Tacuarembó y Paysandú, respectivamente.

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

Muestreo de árboles y mediciones

En total se han realizado 6 inventarios: julio-octubre de 2011, mayo-agosto de 2012, enero de 2013, agosto-diciembre de 2014, julio-enero de 2015 y octubre-marzo de 2016. Las evaluaciones fueron realizadas en las 4 líneas centrales de cada bloque para evitar el efecto de borde. En cada una de las plantaciones se evaluó la supervivencia para cada uno de los años analizados. En cada una de las parcelas se midió el diámetro normal (dn, cm, a 130 cm de altura con una cinta diamétrica

con una precisión de 0.1 cm) de los árboles de las cuatro filas centrales de la parcela (filas de la 2 a la 5), y la altura total de los árboles (h , m) con un hipsómetro Vertex IV (Haglof., Suecia) de las filas 2 y 4. La altura total de la planta se considera como la distancia que existe entre el cuello de la raíz y la base de la yema terminal de la planta. La h del resto de los arboles fue estimada a partir de ecuaciones ajustadas en función del diámetro normal (Anexo II. Ecuación de ajuste altura-diámetro). Fueron medidos los arboles con un dn mayor a 3 cm. En los inventarios de 2012, 2014, 2015 y 2016 se procedió al apeo de 3 a 5 árboles por parcela (especie x densidad de plantación), cuyos dn representaron a las clases diamétricas de mayor frecuencia relativa. Una vez apeados se midió la h y el dn , diámetro en la base (db , cm) a 0.7 metros, y a partir de ahí cada metro hasta una altura correspondiente a un diámetro con corteza de 1 cm. Los árboles apeados fueron pesados con corteza en balanza marca Radwag con precisión de 1 g. A partir de la base, y a una altura correspondiente al 50 y al 75% de la altura total, se extrajeron dos discos de 2 cm de espesor los cuales fueron pesados con corteza en campo. Uno de los discos fue secado en estufa con ventilación y circulación forzada a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ marca Thermo Scientific hasta peso constante y con estos valores fue estimado el porcentaje de materia seca de cada disco. Con el valor de cada disco fue estimada la media ponderada de cada árbol teniendo en cuenta la superficie de los mismos

Densidad básica

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

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

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

Funciones de peso

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

de árboles por hectárea. Las variables que mostraron mayor relación con el Pi fueron: dn , h y $dn \cdot h$.

Peso individual, acumulado e incremento medio anual

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

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

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

Análisis estadístico

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

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

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

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

5. Resultados

Sobrevivencia

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

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

Especie	Densidad Plantación (árboles ha ⁻¹)	Sitios											
		Tacuarembó						Paysandú					
		Edad (meses)											
		12	22	38	46	57	75	8	18	38	49	57	76
<i>E. benthamii</i>	2220	79 (3.2)	77 (3.3)	69 (4.0)	60 (4.1)	60 (3.8)	60 (2.7)	90 (0.6)	89 (0.6)	87 (0.3)	87 (0.3)	85 (1.7)	84 (1.5)
	3330	78 (7.2)	76 (6.6)	70 (7.0)	61 (14.9)	61 (14.8)	52 (11.6)	92 (3.9)	91 (4.3)	90 (4.4)	90 (4.4)	88 (5.2)	87 (4.4)
	4440	74 (9.0)	71 (8.7)	65 (10.1)	65 (9.5)	65 (9.0)	55 (4.9)	85 (2.3)	85 (2.7)	83 (3.3)	83 (3.3)	80 (2.8)	80 (2.8)
	6660	82 (5.7)	80 (4.8)	76 (5.7)	75 (5.0)	73 (4.3)	61 (3.5)	93 (3.2)	91 (3.0)	87 (2.9)	87 (2.6)	82 (2.3)	80 (3.9)
<i>E. dunnii</i>	2220	69 (3.0)	67 (3.5)	62 (4.7)	62 (4.5)	60 (3.8)	57 (4.9)	89 (1.3)	87 (1.8)	86 (1.2)	86 (1.2)	85 (0.9)	85 (0.9)
	3330	61 (7.2)	60 (6.4)	57 (5.7)	56 (5.2)	55 (4.7)	53 (7.3)	96 (0.6)	94 (1.7)	94 (1.9)	93 (1.8)	92 (1.5)	92 (1.8)
	4440	71 (4.9)	68 (4.4)	63 (5.5)	63 (5.5)	62 (5.8)	59 (6.2)	91 (3.0)	91 (3.0)	89 (2.3)	89 (2.3)	86 (1.7)	86 (1.7)
	6660	79 (4.9)	76 (4.6)	71 (3.2)	69 (4.4)	67 (5.0)	62 (3.8)	89 (3.5)	89 (3.2)	85(2.8)	85 (2.8)	81 (3.0)	81 (3.0)
<i>E. grandis</i>	2220	85 (2.6)	81 (3.4)	71 (2.6)	66 (2.0)	64 (2.0)	54 (3.5)	88 (0.9)	87 (0.9)	84 (1.8)	84 (1.8)	84 (1.5)	78 (1.0)
	3330	78 (11.6)	74 (10.6)	63 (8.1)	60 (7.0)	60 (7.0)	47 (4.4)	90 (1.9)	89 (2.2)	84 (1.5)	84 (1.5)	82 (1.5)	73 (2.0)
	4440	82 (4.0)	77 (2.2)	64 (1.0)	60 (1.7)	60 (2.0)	47 (4.5)	93 (2.5)	92 (2.5)	87 (2.9)	87 (2.9)	85 (3.8)	76 (3.4)
	6660	76 (6.4)	69 (5.2)	55 (2.5)	50 (2.9)	49 (2.6)	34 (4.7)	92 (1.7)	88 (1.7)	84 (1.9)	83 (1.8)	81 (1.7)	74 (1.5)

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

Tacuarembó												
Efectos	Edad (meses)											
	12		22		38		46		57		75	
	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor
Especie	3.13	0.061	2.45	0.108	2.07	0.148	0.95	0.397	1.08	0.354	5.74	0.009
Densidad de plantación	0.64	0.593	0.57	0.637	0.42	0.734	0.37	0.772	0.28	0.839	0.66	0.58
E.*D.	0.69	0.653	1.019	0.437	1.32	0.287	1.19	0.344	1.10	0.387	1.27	0.304
Paysandú												
Efectos	Edad (meses)											
	8		18		38		49		57		76	
	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor
Especie	0.31	0.734	0.36	0.701	2.18	0.134	2.25	0.127	1.43	0.258	18.77	1.24e⁻⁰⁵
Densidad de plantación	1.13	0.356	1.18	0.337	1.56	0.225	1.60	0.214	2.84	0.058	2.74	0.065
Especie*Densidad	1.79	0.142	1.32	0.285	1.31	0.29	1.27	0.306	1.23	0.322	1.34	0.276

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

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

Densidad de la madera

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

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

Ajuste de ecuaciones

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

Peso del fuste individual y por hectárea

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

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

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

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

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

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

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

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

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

N: número de observaciones

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

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

N: número de observaciones

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

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

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

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

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

3). En el sitio de Paysandú se observa un aumento creciente en todas las especies y densidades de plantación con el paso del tiempo hasta 75 meses de edad.

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

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

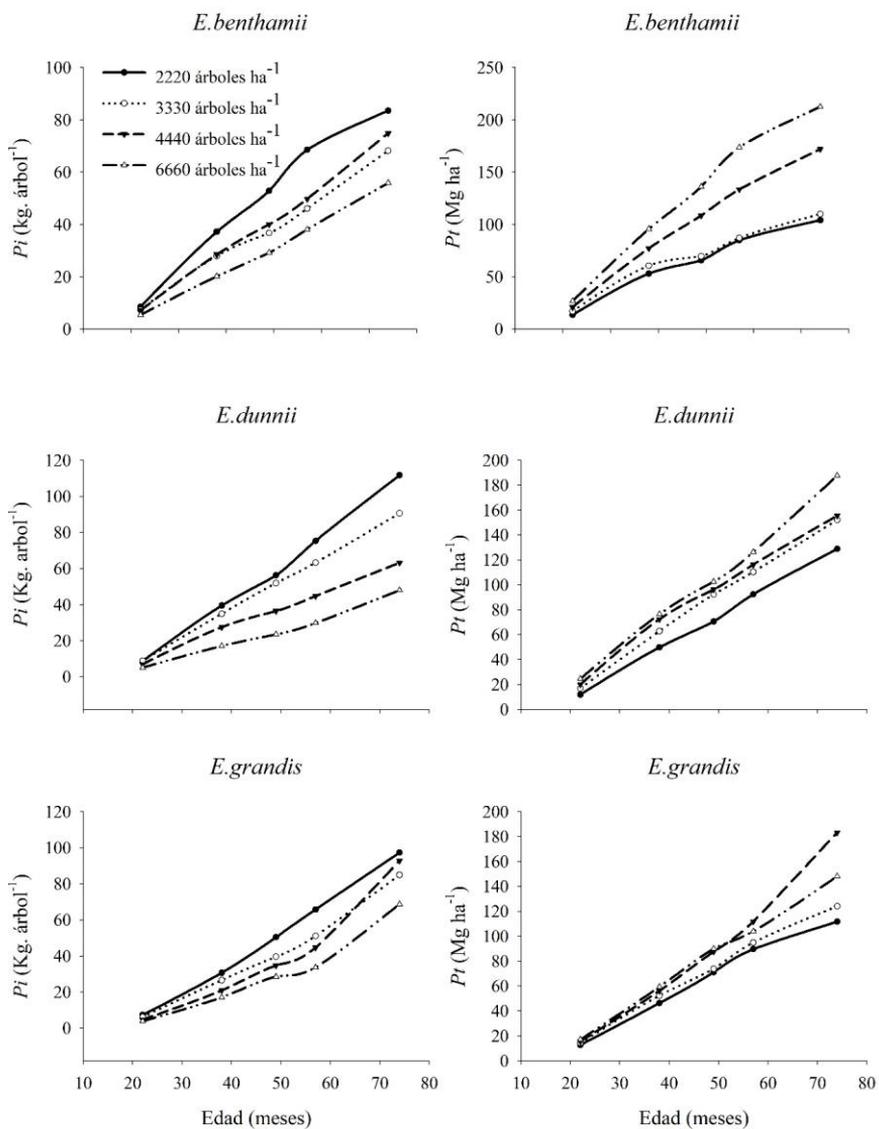


Figura 1. Evolución del P_i y P_t de las especies y densidades de plantación en Tacuarembó

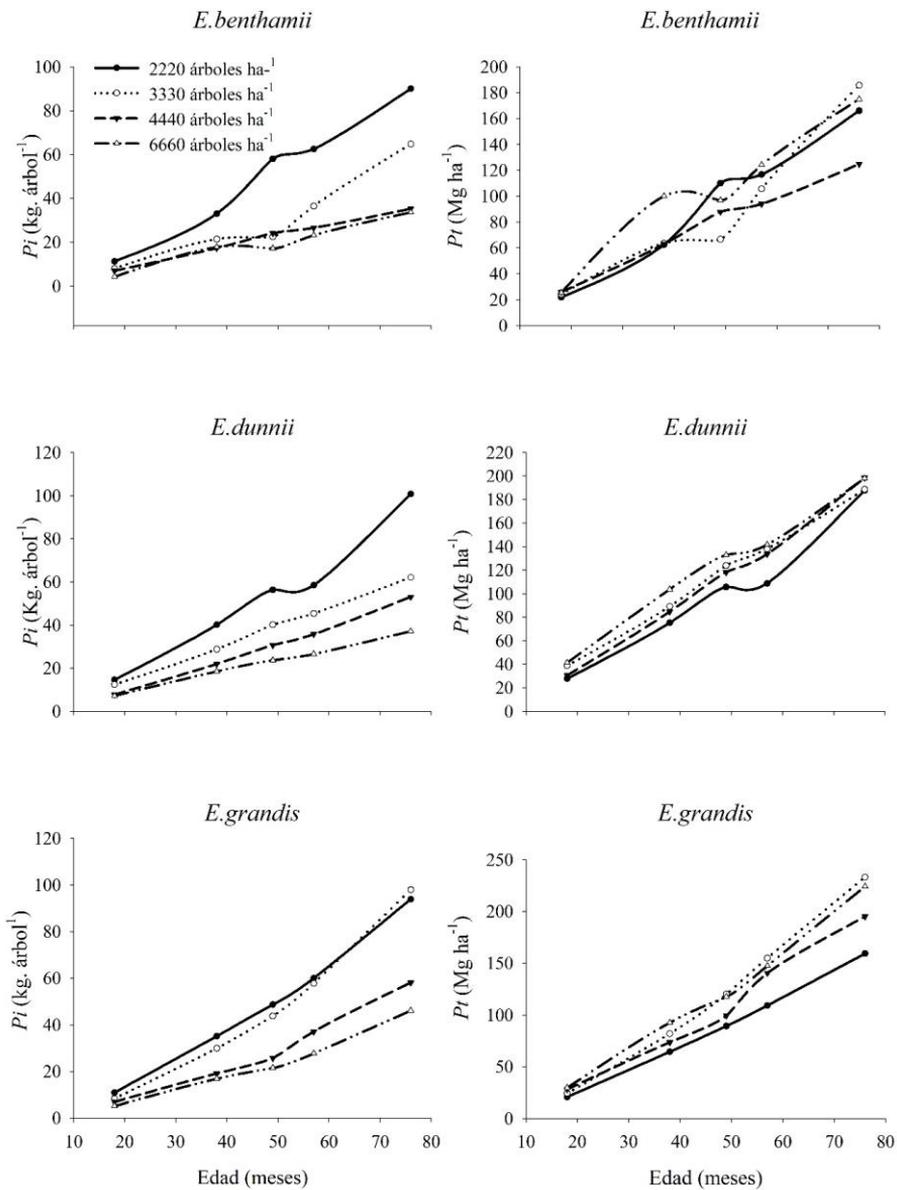


Figura 2. Evolución del P_i y P_t de las especies y densidades de plantación en Paysandú

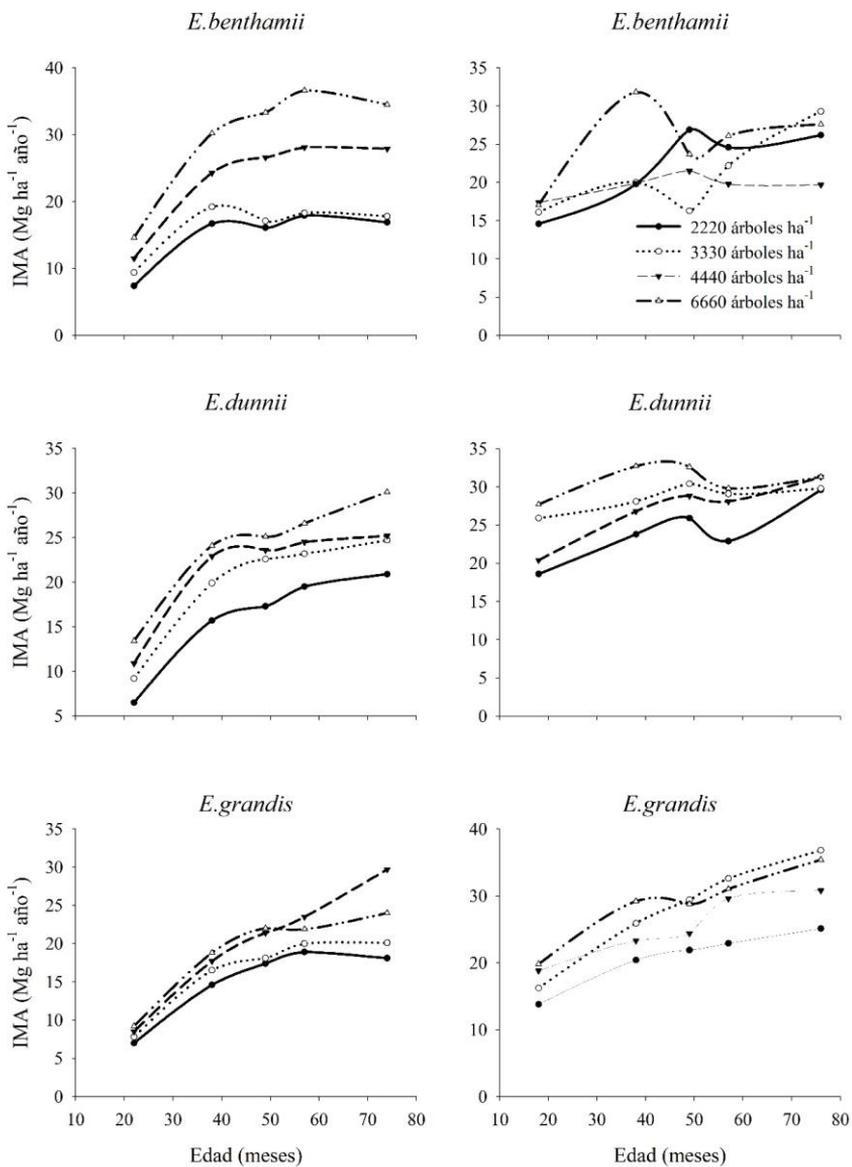


Figura 3. Evolución del IMA del *Pt* para las especies y densidades de plantación en los sitios de Tacuarembó (izquierda) y Paysandú (derecha)

4. Discusión

En este estudio, fueron desarrolladas ecuaciones de biomasa del fuste de especies de eucaliptos específicas del sitio y fue evaluado el efecto de las especies y la densidad de siembra sobre la densidad de la madera y la biomasa individual y por hectárea durante un período des. Aunque los resultados muestran diferencias entre los dos sitios evaluados, nuestra investigación confirma la hipótesis de que las densidades de especies y densidades de plantación afectan la densidad de la madera y la productividad de la biomasa del fuste. Sin embargo, no fue verificada la hipótesis de que las especies y las densidades de plantación tienen algún efecto sobre el largo de rotación. La reducción del turno de cosecha en el sitio de Tacuarembó podría explicarse por una menor sobrevivencia. Los cultivos de corta rotación con eucalipto en Uruguay mostraron una gran variación en la producción de madera del fuste en función del aumento de la densidad de plantación, especialmente en el sitio de Tacuarembó. *E. grandis* plantada a 6660 árboles ha⁻¹ fue la especie más productiva en Tacuarembó mientras que *E. dunnii*, obtuvo la mayor productividad en Paysandú a una densidad de plantación de 4440 árboles ha⁻¹. Las tres especies incluidas en este análisis representan a la mayoría de las plantaciones de biomasa actuales y potenciales en Uruguay (Balmelli y Resquin, 2006). Los resultados de este estudio indican que es posible obtener altos niveles de productividad de madera en un tiempo relativamente corto, incluso con densidades de plantación no muy altas. Es esencial garantizar buenas condiciones de implantación para que el cultivo obtenga altos niveles de productividad a lo largo de las rotaciones.

Sobrevivencia

Si bien existe numerosa información que relaciona el efecto de la competencia entre árboles y la sobrevivencia de los mismos (Dickel et al., 2010; Larson et al., 2015; Van Gunst et al., 2016), en este caso no pudo ser verificada en los primeros 76 meses de crecimiento. Esto, por un lado, podría ser explicado por la tolerancia a la competencia que en general muestran las especies de eucaliptos (Jacobs, 1995; Tomé y Verwijst, 1996) y, por otro, deberse a que hasta el momento no están ocurriendo procesos severos de competencia por factores tales como la luz y el agua (Sale, 2005; Xue et al., 2011). De las especies evaluadas, *E. grandis* es la que registra los valores más bajos de supervivencia en el último inventario en los dos sitios, indicando una mayor susceptibilidad a la competencia entre individuos que la de las otras especies (Schönau y Coetzee, 1989). En el sitio de Tacuarembó se observó un importante descenso en el número de árboles vivos desde el inicio del período de evaluación mientras que en Paysandú, la supervivencia, en general, se mantuvo relativamente alta a lo largo de todo el período. En todos los casos el aumento en la mortalidad de los árboles no estuvo asociada a la densidad de plantación. La mayor tasa de mortalidad en Tacuarembó podría ser explicada por un deficiente control de malezas y preparación del suelo en las etapas posteriores a la plantación comparado con el sitio de Paysandú. Esto podría conducir a una mayor ocurrencia de árboles suprimidos los cuales tienen una mayor tasa de mortalidad con el correr del tiempo (Binkley et al. 2010; Cunningham et al. 2010). El régimen de precipitaciones de ambos sitios muestra que en los primeros dos años se registró un mayor nivel en Paysandú a pesar de que los mismos estuvieron por encima de los niveles medios históricos. Los valores de sobrevivencia obtenidos en el sitio

de Tacuarembó muestra la importancia de una adecuada de las labores previas y posteriores a la plantación en términos del control de malezas y el buen contacto entre el suelo y las raíces de la planta en las primeras etapas del cultivo.

Densidad de la madera

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

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

2°C superior a la registrada en el sitio de Tacuarembó en el periodo 2010-2016 (Figura 4) (INUMET, 2018).

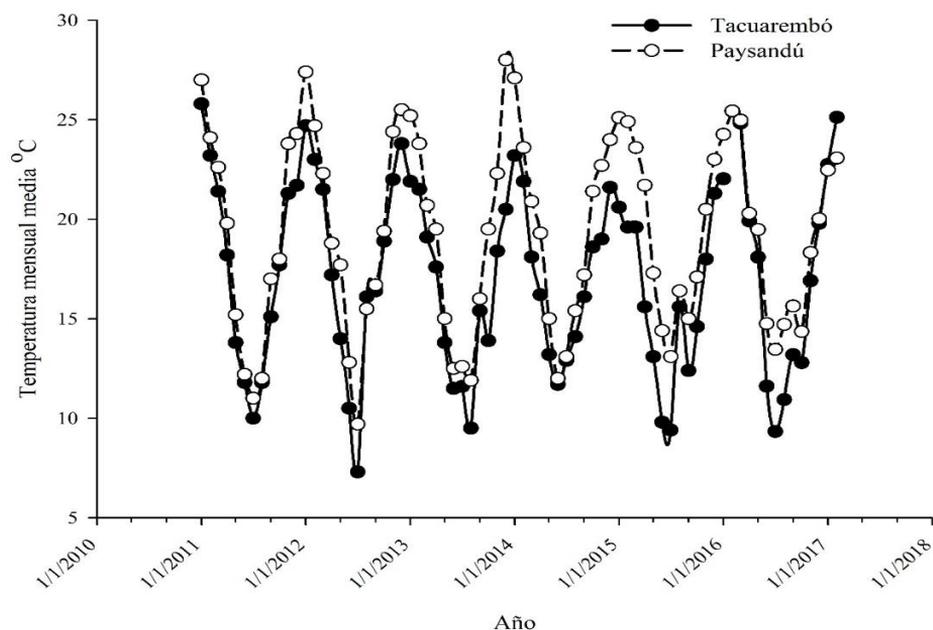


Figura 4: Evolución de la temperatura media mensual en los dos sitios para el período 2011-2017.

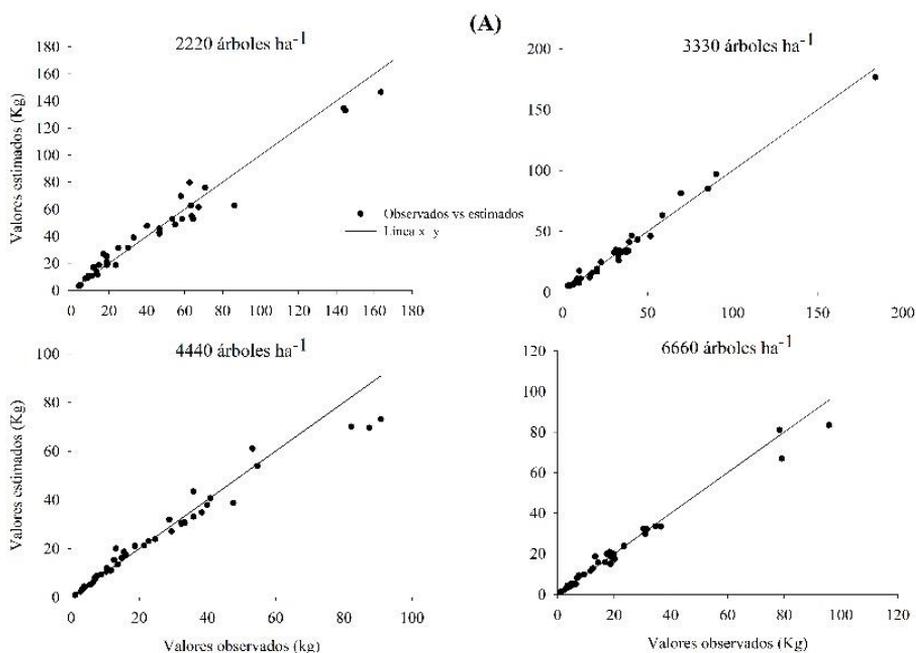
La evolución de la *Db* muestra que en el sitio de Paysandú ocurrió un incremento de esta variable con el aumento de la edad en particular para las menores densidades de plantación (Tabla 4). Los mayores aumentos se produjeron con *E. benthamii* y *E. dunnii* al pasar de 38 a 76 meses, con valores promedio para todas las densidades de plantación del 17% y del 16% entre ambos períodos, respectivamente; alcanzando valores del 23% y del 28% para la densidad de plantación de 2220 árboles por hectárea. Con *E. grandis* el incremento promedio fue del 13%. En todos los casos este cambio se produjo entre los 57 y 76 meses, ya que entre los 38 y 57 meses la *Db* se mantuvo prácticamente sin cambios. En los dos primeros inventarios (38 y 57 meses) la *Db* no tuvo mayores cambios en las diferentes densidades de plantación con las tres especies. En el último de los mismos se observa que las mayores *Db* se obtuvieron con los menores espaciamientos aunque esto solo fue detectado mediante el análisis de varianza en *E. grandis*. Los cambios registrados con el aumento de la edad podrían estar debidos al proceso de transición de la madera juvenil a adulta ocurrida en esas etapas del crecimiento de los árboles (Pelozzi et al., 2012). La proporción ocupada por la madera juvenil es altamente variable dependiendo de la posición en el fuste, material genético, tasa de crecimiento, pero ocupa un radio aproximado de 5 a 8 cm de radio en el entorno de la medula (Oliveira, 1997; Calonego et al., 2005). Este cambio en las propiedades de la madera está explicado por alteraciones en las

características de los elementos del xilema que suceden con el transcurso del tiempo como un aumento del espesor de la pared de las fibras y una reducción de la frecuencias de los elementos de vaso (Sette Jr. et al., 2012). De acuerdo a Latorraca, (2000) la combinación del espaciamiento con la edad determina que el crecimiento en edades tempranas de árboles en espaciamientos amplios ocurre en condiciones de poca competencia relativa por luz. En estas condiciones se produce una alta tasa fotosintética y por lo tanto un leño inicial más denso que en un espaciamiento más reducido. En el sitio de Tacuarembó, en cambio, prácticamente no se registraron cambios de la Db con el aumento de la edad ni con los diferentes espaciamientos en cada uno de los inventarios. El menor crecimiento alcanzado en general en este sitio podría estar asociado a la presencia mayoritaria en el fuste de madera juvenil en todo el período de crecimiento. Una tendencia similar fue reportada por Castro et al., (2016) evaluando clones de especies de *Eucalyptus* con cambios en la Db a partir de los 7 años de edad indicando los diferentes efectos de la edad en distintos materiales genéticos.

4.3 Selección de ecuaciones de estimación de Pi

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

Winck et al., 2015; Mello y Gonçalves, 2008; González-García et al., 2013; Vega-Nieva et al., 2015). Los modelos ajustados en el sitio de Paysandú muestran cierta tendencia a subestimar los valores de P_i para los árboles de mayor tamaño en particular con *E. benthamii* a la densidad de plantación de 4440 árboles por hectárea (Figura 5). De todos modos, en todos los casos fue verificada la homocedasticidad de los residuos mediante el test de Breush-Pagan. En cambio, en el sitio de Tacuarembó no se observa ese sesgo, mostrando que en este sitio los modelos seleccionados tienen una mayor precisión en la estimación del P_i (Figura 6). El ajuste de los modelos, en general, fue muy similar en ambos sitios con una ligera superioridad en el último de los mencionados.



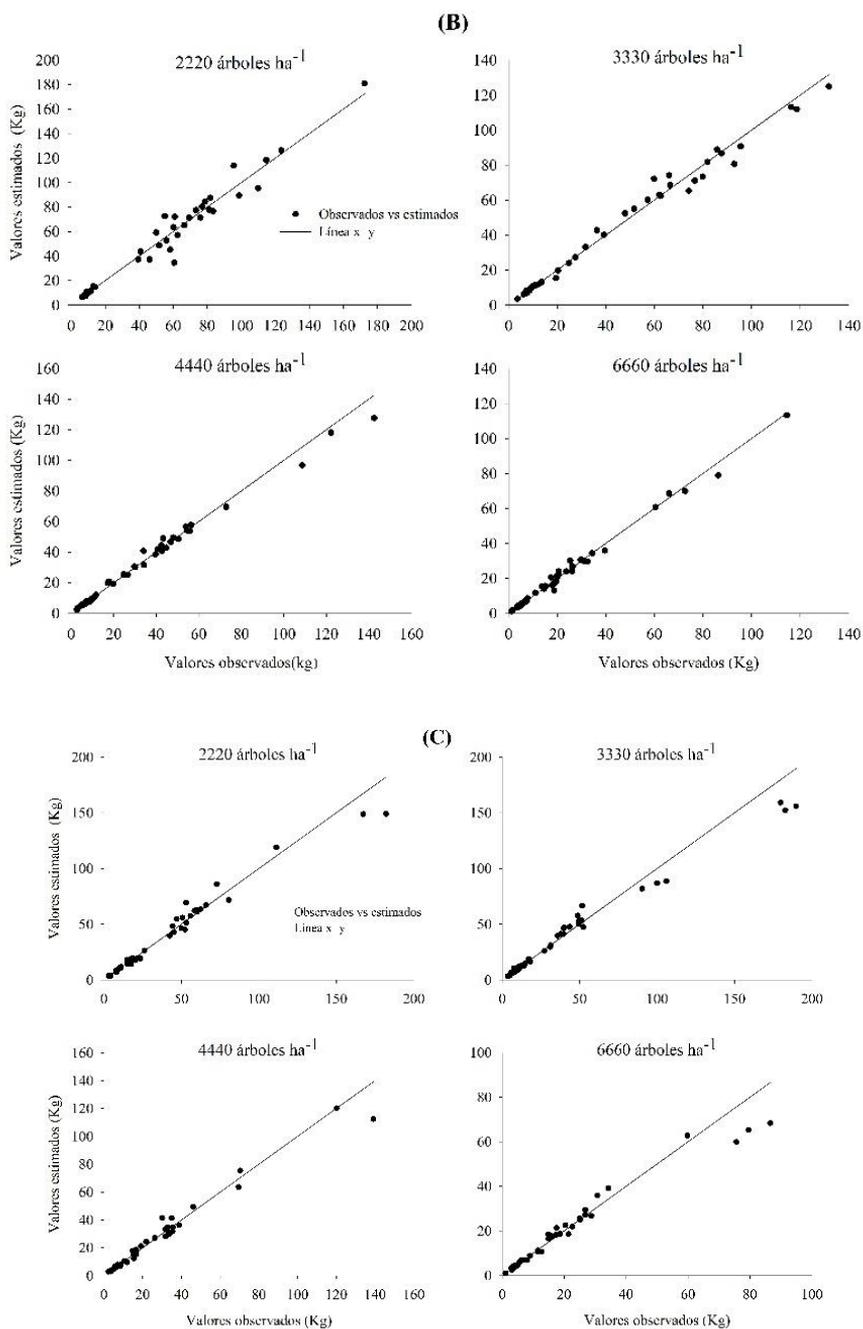
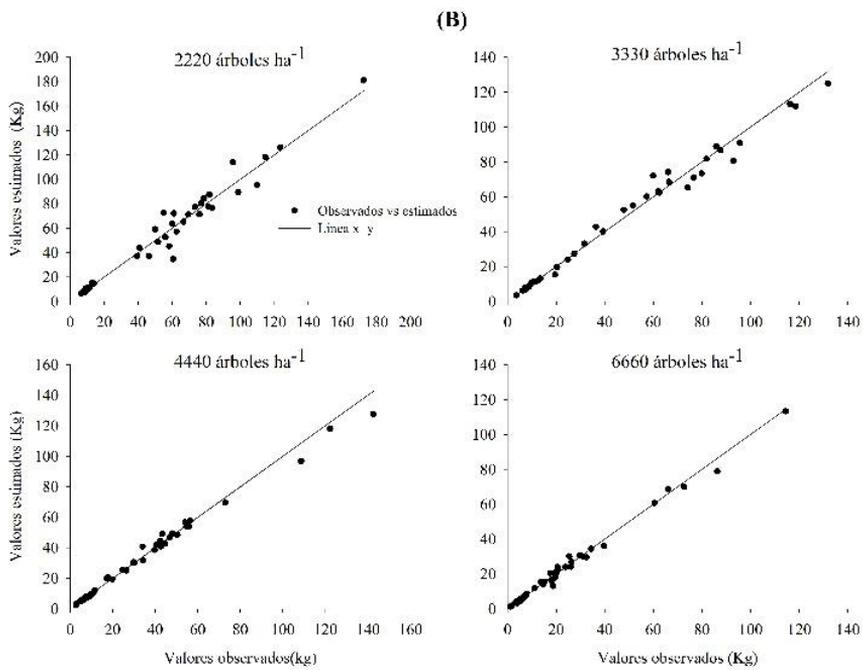
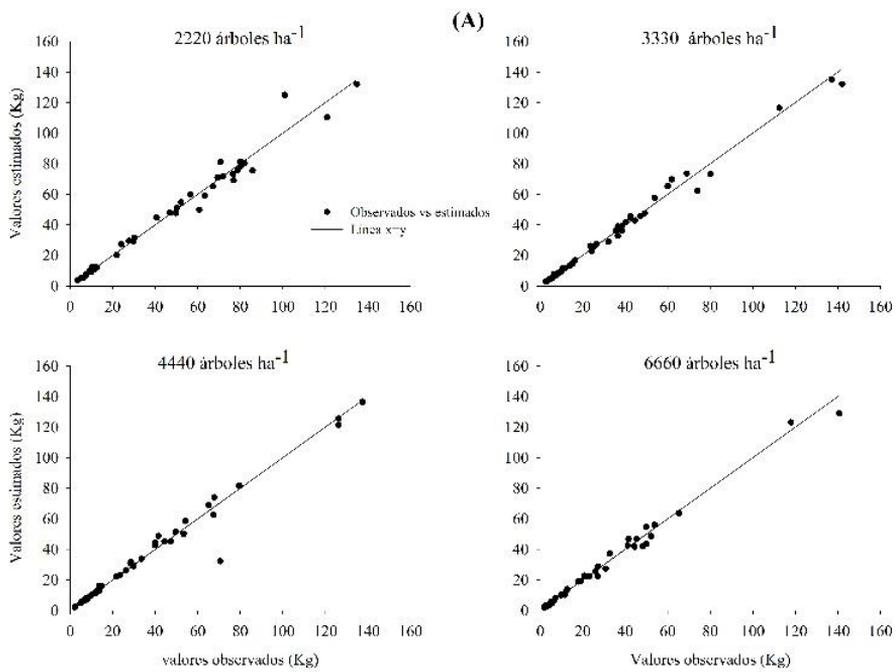


Figura 5. Relación entre los valores observados y estimados del *Pi* de *E. benthamii* (A), *E. dunnii* (B) y *E. grandis* (C) en Paysandú. En todas las Figuras ha sido ajustada la línea 1:1



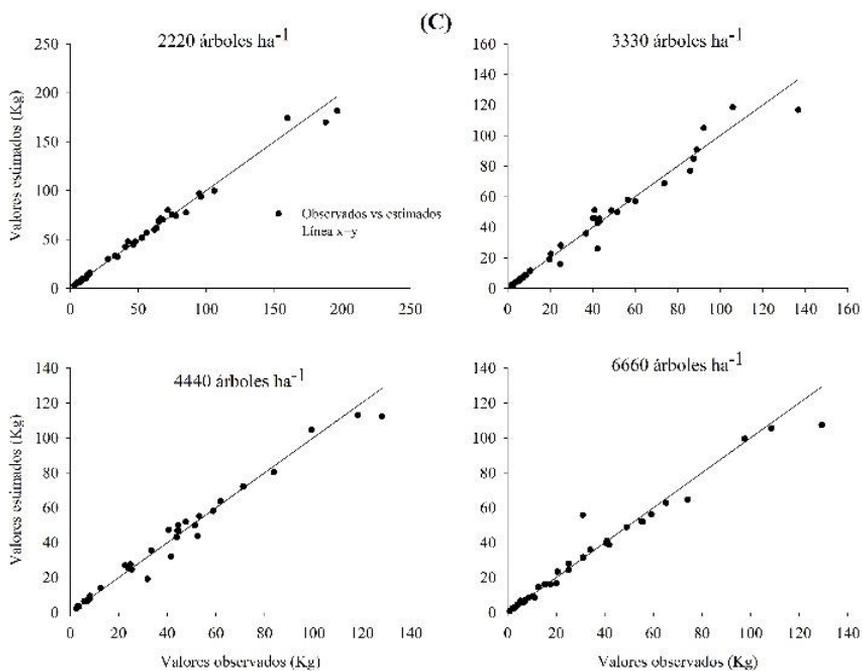


Figura 6. Relación entre los valores observados y estimados del Pi de *E. benthamii* (A), *E. dunnii* (B) y *E. grandis* (C) en Tacuarembó. En todas las Figuras ha sido ajustada la línea 1:1

Peso del fuste individual y por hectárea e IMA

Los resultados del Pi obtenidos en Paysandú muestran que *E. grandis* es la especie que alcanza en promedio el valor más alto, mientras que *E. benthamii* y *E. dunnii* tienen valores inferiores y muy similares entre sí. En términos generales ocurre que el Pi es determinado por el volumen y la Db . En este caso el Pi registrado con *E. grandis* está explicado por el crecimiento individual ya que la Db de esta especie es la más baja de las tres evaluadas. El Pi de esta especie, por tanto, estaría asociado al mayor crecimiento individual que a su vez, está explicado por la menor sobrevivencia en promedio alcanzada (75%) y por consiguiente a una menor competencia entre individuos en relación con lo registrado con *E. benthamii* y *E. dunnii* (83 y 86%, respectivamente). En cuanto al efecto de la densidad de plantación, se obtuvo una evidente relación negativa entre el espaciamiento y el Pi . La reducción del peso promedio para las tres especies al pasar de 2220 a 6660 árboles por hectárea fue del 58%. Esta es una tendencia ampliamente citada en la literatura con especies de eucaliptos y con densidades de plantación similares a las evaluadas en este caso (Vital y Della Lucia, 1987; Müller, 2005; Paulino, 2012; Euftrade Jr. et al., 2016; Hakamada et al., 2017). Considerando las densidades de plantación extremas en promedio para las tres especies, se observa que la relación entre el número de árboles vivos (5137 vs 1802 árboles/hectárea) es

similar a la relación de los pesos individuales promedio (94.9 vs 38.9 kg árbol⁻¹). Este comportamiento del peso es muy similar al registrado con el volumen individual (0.140 vs 0.059 m³/árbol), lo cual indica la alta relación entre ambos parámetros. Resultados similares fueron obtenidos por Leles et al., (2001) evaluando *E. camaldulensis* y *E. pellita* a los 52 meses con densidades de plantación de 2220 y 3330 árboles por hectárea. En el sitio de Tacuarembó, en cambio, el *Pi* depende el efecto combinado de la especie y densidad de plantación. Los mayores pesos son alcanzados con las densidades de plantación más bajas de manera similar para las tres especies. Al igual que en el sitio anterior, la *Db* tampoco explica el comportamiento observado con el *Pi* en relación con el espaciamiento. Los valores medios alcanzados para las especies y densidades de plantación son mayores que en el sitio de Paysandú, probablemente explicados por la mayor competencia ocurrida en este último sitio asociado a la mayor sobrevivencia registrada (84 vs 61%, para Paysandú y Tacuarembó, respectivamente). En ese caso, la reducción del peso promedio para las tres especies fue del 40% con las densidades de plantación extremas (97.5 y 57.6 kg árbol⁻¹ con las densidades 2220 vs 6660 árboles por hectárea, respectivamente). De acuerdo a Santos et al., (2017) el aumento del espaciamiento determina el mayor crecimiento de los árboles, aumentando la frecuencia de árboles dominantes y sin alterar la *Db* por encima de los 3330 árboles por hectárea. Esta mayor similitud de los pesos comparada con la del sitio de Paysandú podría ser atribuida a la estabilidad de la *Db* en los diferentes espaciamientos de manera que las diferencias del peso pueden ser atribuidas básicamente a los cambios ocurridos en el volumen.

En relación con el *Pt*, en el sitio de Paysandú la tendencia muestra que, en general, los mayores valores se obtuvieron con las densidades de plantación más altas. Esto es más evidente con *E. benthamii* y *E. grandis*, ya que con *E. dunnii* se obtuvo un comportamiento relativamente estable en las diferentes densidades de plantación. Esto último es un aspecto relevante ya que sería posible obtener altos rendimientos con bajas densidades de plantación lo que sería una ventaja en términos de la economía de los recursos utilizados (Berger, 2000) así como de la extracción de nutrientes (Bentancor et al., 2019). La respuesta del peso, en este sitio, en los diferentes espaciamientos es menos evidente que los cambios detectados con el volumen (datos sin publicar). Esto está relacionado a la reducción observada en la *Db* de la madera en los espaciamientos más reducidos, lo que determina que no se detecten importantes diferencias en el *Pt* entre las diferentes densidades de plantación. En promedio para todas las especies el incremento en la productividad de 6660 vs 2220 árboles por hectárea es próximo al 18% (199 vs 171 Mg ha⁻¹, respectivamente). En el sitio de Tacuarembó se observó una tendencia similar, en el sentido que el mayor *Pt* se obtuvo con las densidades de plantación más altas, pero con diferencias más marcadas entre las mismas. En este caso las diferencias en el *Pi* entre espaciamientos tuvieron un menor efecto sobre el *Pt* y el mismo fue compensado en mayor proporción por el incremento en el número de árboles. El menor rendimiento en este sitio está explicado por la baja sobrevivencia registrada al final del período de evaluación. En este caso la diferencia entre densidades de plantación fue del 59% (183 vs 115 Mg ha⁻¹ con 6660 y 2220 árboles por hectárea, respectivamente). Las tres especies alcanzaron niveles de *Pt* promedio muy similares entre sí. En términos generales, estos resultados son coincidentes con lo reportado en la literatura en cuanto a que la mayor productividad se obtiene con altas densidades de plantación (Goulart et al., 2003; Rocha, 2011; Navarro et al., 2016) ya que el número de árboles tiene mayor efecto que las eventuales alteraciones que puedan ocurrir con la *Db* (Malan, 2010;

Eloy et al., 2014). Los espaciamientos reducidos determinan una mayor distribución de biomasa en el fuste mientras que los espaciamientos más amplios contribuyen al mayor desarrollo de la copa (Eufrade Junior et al., 2016). La tendencia, en todos los casos, muestra que las diferencias de productividad son cada vez mayores con el paso del tiempo (tanto en el Pi como en el Pt) no detectándose efectos visibles de la competencia entre individuos aun en las densidades de plantación más altas.

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

5. Conclusiones

La sobrevivencia fue en el sitio de Paysandú fue relativamente alta a lo largo de todo el período mientras que en el sitio de Tacuarembó ocurrió una importante mortalidad de árboles desde las primeras etapas del crecimiento. La mayor sobrevivencia se obtuvo con *E. benthamii* y *E. dunnii*, y la mortalidad de árboles en estas especies no se vio afectada por el espaciamiento. En *E. grandis* se detectó una relación más estrecha entre la sobrevivencia y la densidad de plantación, aunque esto no fue confirmado por el análisis estadístico. Los valores más altos de Db fueron registrados con *E. dunnii* y *E. benthamii*, y, en particular, en el sitio de Paysandú. En este sitio, la Db estuvo negativamente relacionada con la densidad de la plantación, mientras que en el sitio de Tacuarembó no se vio afectada por esa variable. La evolución de la Db en el sitio de Paysandú mostró un incremento con la edad (de forma más evidente en las menores densidades de plantación) y con el aumento del espaciamiento, aunque esto último sólo fue detectado en *E. dunnii*. En el sitio de Tacuarembó la Db se mantuvo prácticamente sin cambios en los diferentes inventarios y densidades de plantación. Las ecuaciones de estimación de Pi lograron un alto grado de ajuste en función de la altura y del diámetro normal con funciones de tipo logarítmico en casi todos los casos. Los valores más altos del fuste individual fueron obtenidos con *E. grandis*

en ambos sitios, y con las tres especies se observó una relación negativa de este parámetro con la densidad de plantación. En el sitio de Paysandú se alcanzan los niveles más altos de *Pt* debido a la mayor sobrevivencia registrada en el mismo. En este caso no se detecta una clara relación entre el *Pt* y densidad de plantación, destacando *E. grandis* con la productividad más alta. En el sitio de Tacuarembó se observó una relación más definida entre la densidad de plantación y la productividad de modo que los valores más altos de *Pt* se obtuvieron con los espaciamientos más reducidos. En este caso, *E. dunnii* fue la especie de mayor productividad. En la mayoría de los casos sucede que la brecha en la productividad individual como por hectárea de las diferentes densidades de plantación es cada vez mayor con el paso del tiempo. En ambos sitios el *Pt* depende del efecto combinado de la especie y la densidad de plantación. El IMA del sitio de Paysandú indicaría que hasta los 76 meses no se ha alcanzado el turno de corta en todos los casos mientras que en el sitio de Tacuarembó ocurrió un estancamiento de esta variable a partir de los 57 meses. Esto determinaría un acortamiento del ciclo del cultivo explicado por la importante mortalidad de árboles.

Referencias

- Antonio, N.; M. Tomé; J. Tomé; P. Soares; L. Fontes. 2007. Effect of Tree , Stand , and Site Variables on the Allometry of Eucalyptus globulus Tree Biomass. Can. J. For. Res. 37: 895–906. doi:10.1139/X06-276.
- Assis, M.R. 2012. Modelagem Da Biomassa Seca e Estoque de Carbono Total Em Eucalyptus Considerando Diferentes Estágios Iniciais de Crescimento. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras. Minas Gerais. Brasil. 197 p.
- Backman, M.E.; J. García de León. 2003. Correlations of Pulp and Paper Properties at an Early Age and Full. In EUCEPA Conference : Sustainable Development for the Pulp and Paper Industry, edited by Tecnicelpa, 108–12. Lisbon-Portugal.
- Balboa Murias. M. A. 2005. Biomasa Arbórea y Estabilidad Nutricional de Los Sistemas Forestales de Pinus pinaster Ait., Eucalyptus globulus Labill. y Quercus robur L. En Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. Lugo, España. 256.p.
- Balloni, E. A.; J. W. Simões. 1980. O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais. IPEF - Série Técnica 1 (3): 1–16.
- Balmelli, G.; F. Resquin. 2006. Productividad de Diferentes Especies de Eucalyptus Sobre Areniscas de Tacuarembó-Rivera. Serie Técnica 159. INIA Tacuarembó 159: 305–12.
- Balmelli, G.; F. Resquin. 2004. Evaluación Del Crecimiento de Especies de Eucalyptus En Diferentes Zonas de Prioridad Forestal. Serie Aftercare Forestal INIA - JICA 14: 20.
- Bensaid, S.; R. Conti; D. Fino. 2012. Direct Liquefaction of Ligno-Cellulosic Residues for Liquid Fuel Production. Fuel 94. Elsevier Ltd: 324–32. doi:10.1016/j.fuel.2011.11.053.
- Bentancor, L., J. Hernández; A. Califra; F. Resquín; P. González-Barrios. 2019. Biomass and Bioenergy Evaluation of the biomass production , energy yield and nutrient removal of Eucalyptus dunnii Maiden grown in short rotation coppice under two initial planting densities

and harvest systems, *Biomass and Bioenergy*. Elsevier Ltd, 122(January), pp. 165–174. doi: 10.1016/j.biombioe.2019.01.019.

Berger, R. 2000. Crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* smith sob o efeito do espaçamento e da fertilização. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil. 126 p.

Bi, H.; S. Murphy; L. Volkova; C. Weston; T. Fairman; Y. Li; R. Law; J. Norris; X. Lei; G. Caccamo. 2015. Additive Biomass Equations Based on Complete Weighing of Sample Trees for Open Eucalypt Forest Species in South-Eastern Australia. *Forest Ecology and Management* 349. Elsevier B.V.: 106–21. doi:10.1016/j.foreco.2015.03.007.

Binkley, D., Stape, J.L., Ryan, M.G., Barnard, H.R., Fownes, J., 2002. Age-related Decline in Forest Ecosystem Growth: An Individual-Tree, Stand-Structure Hypothesis. *Ecosystems* 5, 58–67. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0055-7>

Brasil, M. A. M.; M. Ferreira. 1971. Variação Da Densidade Básica Da Madeira de *Eucalyptus alba* Reinw, *E. saligna* Smith e *E. grandis* Hill Ex-Maiden Aos 5 Anos de Idade, Em Função Do Local e Do Espaçamento. *Ipef* 2/3 (2/3): 129–49.

Cailliez, F. 1980. estimacion del volumen forestal y prediccion del rendimiento con referencia especial a los trópicos. vol. 1 - estimacion del estimación volumen. Centre technique forestier tropical, Francia. Estudio FAO: MONTES 22/1. Organizacion de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentacion. Roma 1980. 100 p.

Calonego, F.Wi.; E. T. D. Severo; P. P. Assi. 2005. Mensuração Do Comprimento Das Fibras Para a Determinação Da Madeira Juvenil Em *Eucalyptus citriodora*. *Scientia Forestalis* 68: 113–21.

Cassidy, M.; G. Palmer; R. G. B. Smith. 2013. The Effect of Wide Initial Spacing on Wood Properties in Plantation Grown *Eucalyptus pilularis*. *New Forests* 44 (6): 919–36. doi:10.1007/s11056-013-9385-5.

Castaño, J. P.; A. Ceroni; M. Furest; J. Aunchayna; R. Bidegain. 2011. Caracterización Agroclimática Del Uruguay 1980-2009. Serie Técnica INIA 193. Montevideo, Uruguay.: 33.

Castro, A. F. N. M.; R. V.O. Castro; A. D. C. Oliveira; R. C. dos Santos; A. M. M. L. Carvalho; P.F. Trugilho; I.C. N. A.de Melo. 2016. Correlations between Age, Wood Quality and Charcoal Quality of *Eucalyptus* Clones. *Árvore* 40 (3): 551–60.

Cunia, T. 1964. Weighted Least Squares and Construction of Volume Tables. *Forest Science* 10 (2): 180–91.

Cunningham, S.C., Thomson, J.R., Read, J., Baker, P.J., Nally, R.M., 2010. Does stand structure influence susceptibility of eucalypt floodplain forests to dieback? *Austral Ecol.* 35, 348–356. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2009.02043.x>.

de Mello, J.C.; R. Fernandez. 2000. Aptitud Papelera En 4 Especies de *Eucalyptus* (*E. grandis* W. Hill Ex Maiden; *E. dunnii*, *E. viminalis* Labillardière y *E. badjensis* Beuzev & Welch). Tesis Ing. Agr. Universidad de la Republica Oriental del Uruguay. Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay.

- Debell, D. S.; Ch. R. Keyes; B. L. Gartner. 2001. Wood Density of Eucalyptus Saligna Grown in Hawaiian Plantations : Effects of Silvicultural Practices and Relation to Growth Rate. *Australian Forestry* 64 (December 2014): 106–10. doi:10.1080/00049158.2001.10676173.
- Dickel, M.; H. Kotze; K. von Gadow; W. Zucchini. 2010. Growth and Survival of Eucalyptus grandis - a Study Based on Modelling Lifetime Distributions. *Mathematical and Computational Forestry & Natural-Resource Sciences (MCFNS)* 2 (2): 86--96 (11). <http://mcfns.com/index.php/Journal/article/view/MCFNS.2-86>.
- Eloy, E.; B. O. Caron; D. A. da Silva; D. Schmidt; R. Trevisan; A. Behling; E. F. Elli. 2014. Influência Do Espaçamento Nas Características Energéticas De Espécies Arbóreas Em Plantios De Curta Rotação. *Revista Arvore* 38: 551–59. doi:10.1590/S0100-67622014000300018.
- Eufrade Junior, H.; R.X. De Melo; M.M. Pereira Sartori; S.P.S Guerra; A.W. Ballarin. 2016. Sustainable Use of Eucalypt Biomass Grown on Short Rotation Coppice for Bioenergy. *Biomass and Bioenergy* 90: 15–21. doi:10.1016/j.biombioe.2016.03.037.
- Foelkel, Celso. 1978. Madeira de Eucalipto: Da Floresta Ao Digestor. http://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/Madeira%20do%20eucalipto_%20da%20floresta%20ao%20digestor.pdf 27 p.
- García-Villabrille, J. D.; F. Crecente-Campo; C. Pérez-Cruzado; R. Rodriguez-Soalleiro; U. Diéguez-Aranda; A. Rojo-Alboreca. 2015. Biomass and Carbon Content in Galicia (NW Spain) Eucalyptus globulus Labill . Stands. *Recursos Rurais* 10: 45–52.
- Garcinuño, J. 1995. Biomasa aérea en plantaciones jóvenes de Eucalyptus globulus (Lab) en la costa de Valdivia, Xª región. Tesis Ing. Forestal. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, 1995, 76 p.
- Garlet, NV. 1994. Influência do espaçamento das árvores de Eucalyptus grandis na qualidade da madeira para produção de polpa celulósica kraft. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil. 80 p.
- González-García, M.; A. Hevia-Cabal; M. Barrio-Anta. 2013. Modelo Dinámico de Crecimiento y Producción de Biomasa Para Cultivos Energéticos de Eucalyptus nitens (Maiden) En El Noroeste de España. In 6 to Congreso Forestal Español, edited by Sociedad Española de Ciencias Forestales, 2–8. Vitoria Gateiz. http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/viewFile/14333/14176.
- Goulart, M.; C. R. H. Haselein; J. M. Hoppe; J. A. Farias; D. T. Pauleski. 2003. Massa Específica Básica e Massa Seca de Madeira de Eucalyptus grandis Sob o Efeito Do Espaçamento de Plantio e Da Posição Axial No Tronco. *Ciência Florestal* 13 (2): 167–75.
- Hakamada, R.; R. M. Hubbard; S. Ferraz; J. L. Stape; C. Lemos. 2017. Biomass Production and Potential Water Stress Increase with Planting Density in Four Highly Productive Clonal Eucalyptus Genotypes. *Southern Forests: A Journal of Forest Science* 2620 (March): 1–7. doi:10.2989/20702620.2016.1256041.

Harris, F. 2007. The effect of competition on stand, tree, and wood growth and structure in subtropical *Eucalyptus grandis* plantations, PhD thesis, Southern Cross University, Lismore, NSW. 193 p.

Hinchee, M.; W. Rottmann; L. Mullinax; C. Zhang; S. Chang; M. Cunningham; L. Pearson; N. Nehra. 2011. Short-Rotation Woody Crops for Bioenergy and Biofuels Applications. *Biofuels: Global Impact on Renewable Energy, Production Agriculture, and Technological Advancements*, 139–56. doi:10.1007/978-1-4419-7145-6_8.

International Energy Agency (IEA). 2010. "World Energy Outlook 2010."

IRENA. 2016. Innovation Outlook Advanced Liquid Biofuels. http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Innovation_Outlook_Advanced_Liquid_Biofuels_2016.pdf.

Jacobs, M. R. 1955. Growth Habits of the Eucalypts, Forestry and Timber Bureau. Canberra, New Zealand: Forestry and Timber Bureau. <http://trove.nla.gov.au/version/28637821>.

Jokela, E.J.; K.P. Van Gorp; E.H. White. 1986. Biomass Estimation Equations for Norway Spruce in New York. *Can. J. For. Res.* 6: 413–15.

Kojima, M.; F. M. Yamaji; H. Yamamoto; M. Yoshida; T. Nakai. 2009. Effects of the Lateral Growth Rate on Wood Quality Parameters of *Eucalyptus grandis* from Different Latitudes in Brazil and Argentina. *Forest Ecology and Management* 257 (10): 2175–81. doi:10.1016/j.foreco.2009.02.026.

Kuyah, S.; J. Dietz; C. Muthuri; M. Van Noordwijk; H. Neufeldt. 2013. Allometry and Partitioning of Above- and below-Ground Biomass in Farmed *Eucalyptus* Species Dominant in Western Kenyan Agricultural Landscapes. *Biomass and Bioenergy*. Elsevier Ltd, 1–9. doi:10.1016/j.biombioe.2013.02.011.

Larson, A.J.; J. A. Lutz; D. C. Donato; J. A. Freund; M.E. S. J. HilleRisLambers; D. G. Sprugel; J. F. Franklin. 2015. Spatial Aspects of Tree Mortality Strongly Differ between Young and Old-Growth Forests. *Ecology* 96 (11): 2855–61. doi:10.1890/15-0628.1.

Larson, P.R.; D. E. Kretschmann; A. Clark III; J. G. Isebrands. 2001. Formation and Properties of Juvenile Wood in Southern Pines. A Synopsis. Rhinelander, Wisconsin. United States Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. General Technical Report. 46 p.

Latorraca, J.V. d.; F., C.E. de Albuquerque. 2000. Floresta e Ambiente. *Floresta e Ambiente* 7 (1): 279–91.

Leles, P. S. D. S.; G. G. D. Reis; M. D. G. F. Reis; E. J. D. Moraes. 2001. Crescimento , Produção e Alocação de Matéria Seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. Pellita* Sob Diferentes Espaçamentos Na Região de Cerrado , MG. *Scientia Forestalis* 59: 77–87.

Lopes, E.D.; M. L.de Laia; A. S. dos Santos; G. M. Soares; R. W. P. Leite; N. D. S. Martins. 2017. Influência Do Espaçamento de Plantio Na Produção Energética de Clones de *Corymbia* e *Eucalyptus*. *Floresta* 47 (1): 95. doi:10.5380/ufv.v47i1.47141.

- Macedo, I. C. De. 2003. Estado Da Arte e Tendências Tecnológicas Para Energia. CTenerg. Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Energia. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Ciência, Tecnologia e Inovação. 90 p.
- Machado, F.; S. P. S. Guerra; N. Ceragioli; G. Oguri; M. S. Denadai. 2012. Influência Do Espaçamento Na Produtividade e Alocação de Biomassa Em Um Plantio de *Eucalyptus grandis*. In Congresso Internacional de Bioenergia, 1–6. São Paulo, Brazil.
- Malan, F S. 2010. The Effect of Planting Density on the Wood Quality of South African-Grown *Eucalyptus grandis*. The Southern African Forestry Journal, 205:1, 31-37, DOI: 10.2989/10295920509505235.
- Malan, F. S.; M. Hoon. 1992. Effect of Initial Spacing and Thinning on Some Wood Properties of *Eucalyptus grandis*. South African Forestry Journal 163 (163): 13–20. doi:10.1080/00382167.1992.9629362.
- Mello, S. L. D. M.; J. L. D. M. Gonçalves. 2008. Equations to Estimate Shoot and Root System Biomass in *Eucalyptus grandis* Stands at Sites with Different Productivities. Revista Arvore 32 (1): 101–11.
- Mello, W. H. d. A.; J. W. Simões; C. A. Ferreira, U. M. Brasil. 1976. Influência Do Espaçamento E Da Idade De Corte Na Produção De Madeira De Eucalipto Em Solo De Cerrado. IPEF 13: 143–62.
- Meneses, V. A., P. F. Trugilho, N. Calegario, H. G. Leite. 2015. Efeito Da Idade e Do Sítio Na Densidade Básica e Produção de Massa Seca de Madeira Em Um Clone Do *Eucalyptus urophylla*. Scientia Forestalis/Forest Sciences 43 (105): 101–16.
- MGAP. 1976. Carta de Reconocimiento de Suelos Del Uruguay a Escala 1/1000.000 y Clasificación de Suelos Del Uruguay. Montevideo, Uruguay. 452 p.
- Mimms, A.; M.J. Kocurek; J.A. Pyiatte; E.E. Wright. 1993. Kraft Pulping. A Compilation of Notes. TAPPI, Atlanta, GA, USA. 181 p.
- Miranda, I., J. Gominho, H. Pereira. 2009. Variation of Heartwood and Sapwood in 18-Year-Old *Eucalyptus globulus* Trees Grown with Different Spacings. Trees 23: 367–72. doi:10.1007/s00468-008-0285-9.
- Müller, M.D. 2005. Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba, MG. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil. 108 p.
- Navarro, A.; A.M. Stellacci; P. Campi; C. Vitti; F. Modugno; M. Mastrorilli. 2016. Feasibility of SRC Species for Growing in Mediterranean Conditions. Bioenergy Research 9 (1): 208–23. doi:10.1007/s12155-015-9677-z.
- Nuberg, I. K.; B. Gunn; M. Tavune; A. Sumareke; O. Kravchuk. 2015. ScienceDirect Evaluation of Short-Rotation Coppicing Fuelwood Production Systems for Papua New Guinea. Biomass and Bioenergy 78. Elsevier Ltd: 126–39. doi:10.1016/j.biombioe.2015.04.010.
- Oliveira, J.T.S. 1997. Caracterização Da Madeira de Eucalipto Para a Construção Civil. Universidade de São Paulo. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, USP, Brasil. 414 p.

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

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

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

Yang, Y.; J. G. Brammer; A. S N Mahmood; A. Hornung. 2014. Intermediate Pyrolysis of Biomass Energy Pellets for Producing Sustainable Liquid, Gaseous and Solid Fuels. *Bioresource Technology* 169. Elsevier Ltd: 794–99. doi:10.1016/j.biortech.2014.07.044.

Zobel, B.J.; J. B. Jett. 1995. *Genetics of Wood Production*. Edited by T.E.Timmel. Syracuse: Springer-Verlag.

Web References

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

INUMET. Consultado el 12 de Abril de 2017. Disponible en <https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas>

Bambú en Perú

Mary Flor Césare¹; José Luis Titto¹; Raphael Paucar²; José Luis Calle³; Héctor Gonzales Mora⁴

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

²Red Internacional del Bambú y el Ratán - IMBAR

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

⁴Circulo de Investigación en Bambú. Facultad de Ingeniería Forestal. Universidad Nacional Agraria La Molina. Av. La Molina s/n, La Molina (Perú)

Correponging Author: Césare Coral, Mary Flor. mcesare@lamolina.edu.pe

1. Características generales

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



Figura 1. Plantación de bambú

El número de especies descritas de bambú varía de acuerdo a los autores, el INBAR (2015) sostiene que existe alrededor de 1600 especies, Mercedes (2006) menciona que existe 1250 especies, mientras que el Centro de Investigación sobre la Desertificación de la Universidad de Sassari (NRD UNISS) y la Fundación AVSI (2017) describe que en el mundo existe más de 1100 especies diferentes. El Grupo de Filogenia de Bambú [BPG] (2012) describe a 1482 especies clasificadas aproximadamente en 119 géneros, que a su vez se agrupan en tres tribus: Arundinarieae (bambúes leñosos templados, 546 especies), Bambuseae (bambúes leñosos tropicales, 812 especies) y Olferae (bambúes herbáceas, 124 especies). Los bambúes se encuentran de manera natural en todos los continentes, excepto en Europa. Las especies más comunes de acuerdo a su grado de importancia son: 1) *Guadua angustifolia* Kunt 2) *Guadua amplexifolia* Presl, 3) *Guadua macrospiculata* X. Londoño y L.G. Clark, 4) *Aulonemia queko* 5) *Cladoclamum geminatum* (McClure), (6) *R. harmonicum* (Pilger) McClure, 7) *R. longispiculatum* X. Londoño y L.G. emiflorum (Steudel) McClure, 9) *Chusquea antioquiensis* L.G. Clarky & X. Londoño y (10) *Chusquea subulata* L.G. Clark.

2. Biología

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

Tabla 1. Clasificación de bambú

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

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

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

2.1 Principales géneros de bambú en el Perú

En la siguiente tabla nos muestra los diferentes géneros presentes en el Perú

Tabla 2. Clasificación de bambú

Género y N° Especies nativas:		Género y N° Especies Exóticas	
Arthrostylidium sp	2	Aulonemi SP	7
Chusquea sp	22	Bambusa sp	5
Elytostachys sp	1	Dendrocalamus sp	1
Guadua sp	5	Phyllostachys sp	2
Merostachys sp	1	Gigantocloa	1
Neurolepts sp	2	Rhipidocladum	2

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

3. Estado de madurez del Bambú

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



Figura 2. Diferentes estadios de una planta de bambú

Fuente:

<https://www.mindomo.com/fr/mindmap/maderas-94cceed29994b1ca52a05edcad3781a>

4. Características botánicas

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

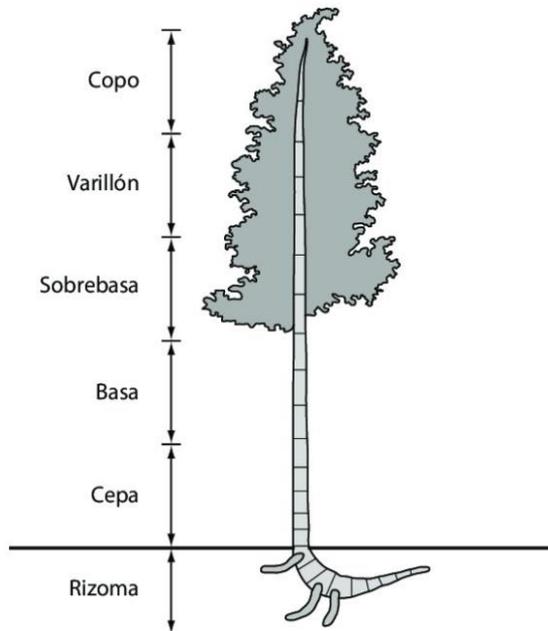


Figura 3. Partes de bambú

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

4.1. Rizomas

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



Figura 4. Rizomas de bambú a) Rizomas leptomórficos b) Rizomas paquimórfos.

Fuente: Permatri 2016

4.2. Raíz

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

4.3. Brotes

Estos se caracterizan por estar cubiertos de hojas caulinares de diversa forma, color, textura y tamaño, la mayoría de los cuales pueden ser utilizadas como alimento; pero por sus cualidades culinarias, las más adecuadas son de las especies *Phyllostachys pubescens* y *Dendrocalamus asper*. En promedio, 100 g de brote contiene 0,5 a 0,77 g. de fibra, 81 a 96 mg de calcio, 0,5 a 1,7 mg de hierro, 3,2 a 5,7 mg de vitamina C, 0,07 a 0,14 mg de vitamina B, 1,3 a 2,3 g de proteína, 4,2 a 6,1 g de hidratos de carbono, 42 a 59 mg de fósforo y 1,8 a 4,1 g de glucosa. Los brotes pueden contener hasta 17 aminoácidos, en particular la sacaropina, el ácido esperámico y el ácido glutámico. Algunas especies también contienen cantidades importantes de potasio y vitamina A.



Figura 5. Brotes de bambú de *Guadua angustifolia*

4.4. Tallo

El tallo del bambú es propiamente dicho el culmo, también se le llama caña o vara. El culmo es la parte más visible de la planta que se desarrolla a partir de los brotes. Aparecen como cilindros alargados con articulaciones intermitentes conocidos como 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 peciolo del tallo (Akinlabi et al., 2017).



Figura 6. Tallo de bambú *Guadua angustifolia*

Los culmos pueden ser erectos, zigzagueantes, doblados o rezagados. El diámetro del tallo varía de especie a especie, hay tallo de especies tan delgadas como lápiz, otras de casi 20 cm de diámetro. Banik (2015) observó que el diámetro de la caña de bambú es en función de las condiciones de hábitat y la edad. A medida que incrementa la edad, el diámetro de los culmos generados también se incrementa. El espesor máximo de la pared del culmo se ubica en la región base y superior, mientras que la región media tiene paredes más delgadas. La ventaja de tener paredes delgadas es ayudar a mejorar la propiedad elástica del bambú para resistir la carga externa del fenómeno natural.

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

El tallo de bambú puede ser cónico o elíptico y comprende varios nudos y entrenudos. El entrenudo es hueco con nudos en ambos extremos. Los nudos contribuyen a asegurar que el

bambú sea relativamente recto y permite el almacenamiento de agua y nutrientes. La longitud del entrenudo es en función de la especie y la genética. La vaina y los brotes se desarrollan y emergen de la región nodal.

4.5. Vaina

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

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

4.6. Ramas

Las ramas se desarrollan a partir de cogollos cubiertos por vainas laterales, que emergen por encima de la vaina. La ramificación se produce cuando surge el culmo o al año siguiente, denominado silepsis o prolepsis, respectivamente. La silepsis se observa en los géneros *Bambusa*, mientras que la prolepsis es típica de *Melocanna baccifera*. Dependiendo de la especie, puede producirse dos tipos principales de ramificación: ramificación dominante-robusta (se observa en los géneros *Bambusa*) y numerosas ramificaciones subequales (se observa en *Melocanna baccifera*).



Figura 7. Ramas de bambú *Guadua angustifolia*

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

4.7. Hojas

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



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

4.8. Flor

Generalmente, los bambúes no son plantas con flores anuales, sino en la mayoría de los casos, la floración es después de un largo intervalo de fase vegetativa de la vida, que es de 15 a 60 años en bambúes tropicales y 60 – 120 años en bambúes de regiones templadas. Existe evidencia de ciclos de floración regular de 30 años para la mayoría de especie de bambú leñosos tropicales, ejemplo la *Guadua angustifolia* (INBAR, 2015; Guerreiro, 2013).



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

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

4.9. Semillas

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



Figura 10. Semillas de bambú *Guadua weberbaueri*

5. Distribución

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

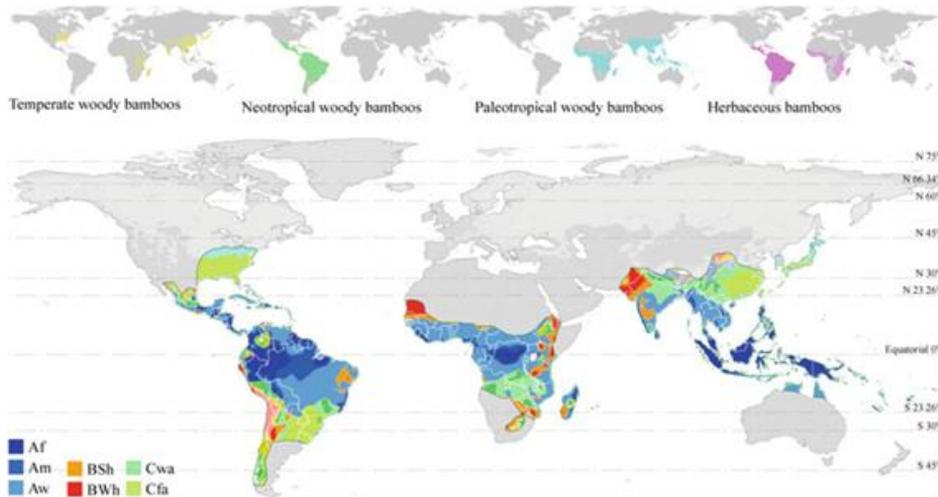


Figura 11. La distribución de bosque de bambú. Nota Af: Clima selva tropical; Am: clima monzón tropical; Aw: clima de sabana tropical; BSh: clima semárido caliente; BWh: clima calido del desierto; Cwa/Cfa: clima subtropical húmedo. Fuente: Huang, 2019.

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

6. Exigencias del cultivo

6.1. Topografía y suelo

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

La mayoría de los bambúes presentan un crecimiento normal en suelos arenosos y bien drenados. También en suelos franco arcillosos, siempre que las condiciones de drenaje, lluvia y

temperatura sean favorables. La topografía y la condición del suelo son los principales factores que afectan el crecimiento dentro de la misma región climática. Suelo suelto y fértil con alto contenido de materia orgánica, buena capacidad de retención de agua y permeabilidad facilita el crecimiento del rizoma. El crecimiento del rizoma se retrasa y se retuerce con rizomas cortos y anormales en suelos compactos y pesados que tiene poca agua, baja permeabilidad y bajo contenido de nutrientes. El contenido de N del suelo es el factor más importante que afecta al crecimiento del bambú, pero la materia orgánica, la textura, la aireación, la capacidad de intercambio de bases y la profundidad también importante. El pH de 5.0 – 6.5 es adecuado para la mayoría de bambúes; algunas especies pueden crecer incluso a pH 3.5.

6.2. Temperatura y luz

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

6.3. Altitud

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

6.4. Precipitaciones

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

7. Principales enfermedades y plagas

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

7.1. Insectos

Gusano alambre de bambú

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

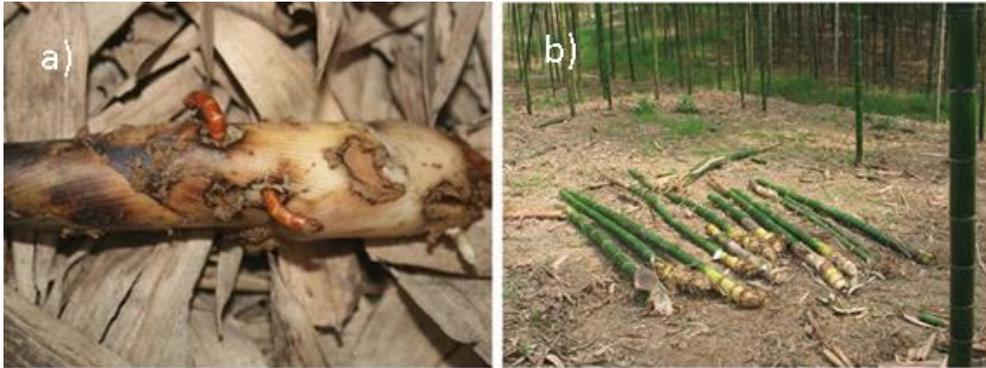


Figura 12: Daño causado por gusano de alambre: a) brote de *Phyllostachys praecox* afectado; b) bambúes muertos causados por gusano de alambre. Fuente: Shu y Wang, 2015.

Noctuidos

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



Figura 13: Noctuidos de bambú. (a) *Apamea kumaso*; (b) *Oligia vulgaris*; (c) *Apamea apameoides*; (d) *Apamea repetita conjuncta*. Fuente: Shu y Wang, 2015.

Gorgojos de bambú

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

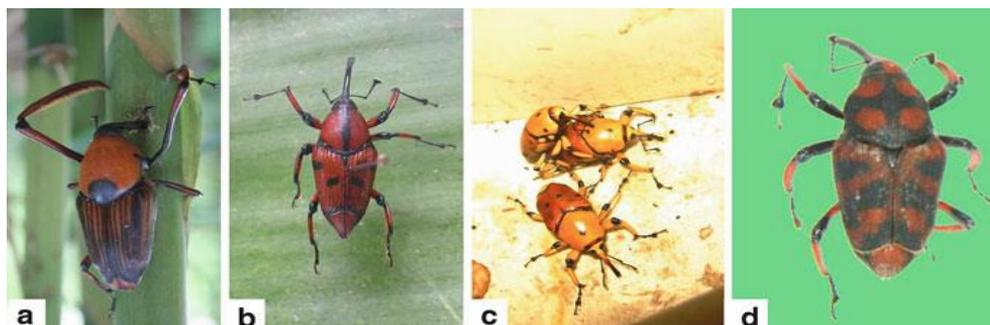


Figura 14: Gorgojos del brote de bambú. (a) *Cyrtotrachelus longimanus*; (b) *Otidognathus davidis*; (c) *Otidognathus* sp.; (d) *Otidognathus rubriceps*. Fuente: Shu y Wang, 2015.



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

Langosta de bambú

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

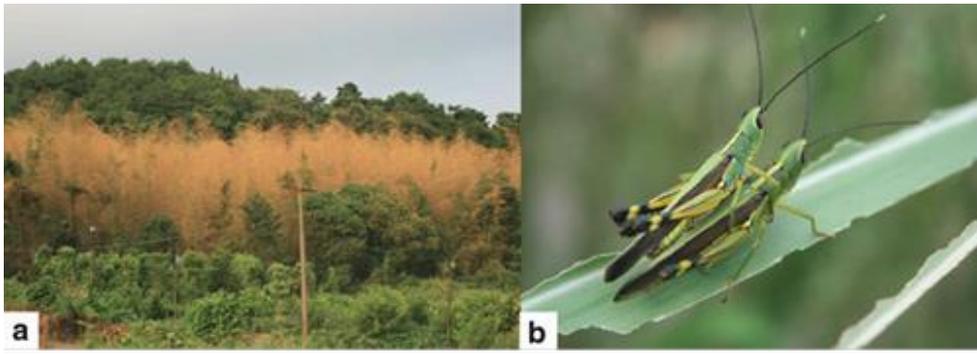


Figura 16: Síntomas de daños por langostas de bambú. a) Langostas comen hojas de bambú; b) Adulto de las langostas espinas amarillas de bambú.

Rodillos de hojas

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

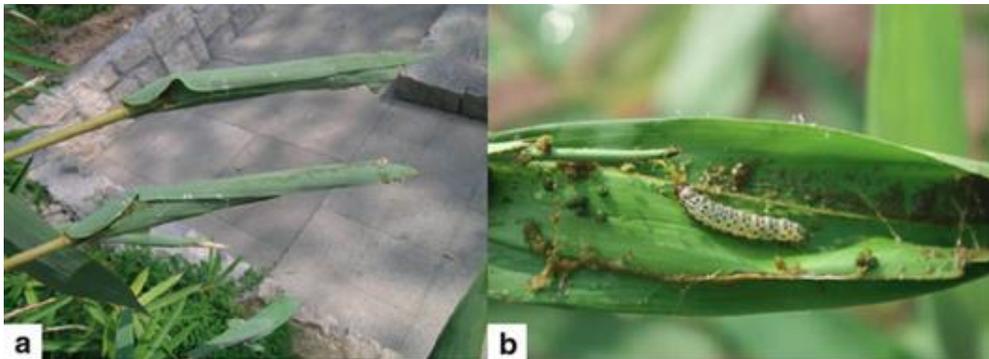


Figura 17: Síntomas de daño de los rodillos de la hoja. a) rodillo de hoja; b) larvas en rodillo

Plagas del culmo y rama

Existe más de 300 especies que se alimentan de ramas y tallos de bambú, la mayoría de estos son plagas de insectos (Xu y Wang, 2004). Las especies más importantes son: insecto hedor (*hemiptera pentatomidae*), insecto coreido (*hemiptera coreidae*), froghoppers (*homoptera cercopidae*), pulgones (*homoptera:aphididae*), insectos escamosos (*homoptera: asterolecaniidae*) y los que producen llagas (*hymenoptera eurytomidae* y *ceraphronidae*). En muchos casos, tanto las ninfas como los adultos tienen piezas bucales perforadoras y chupadoras altamente modificadas, se alimentan de la savia de las hojas, inyectan compuestos tóxicos en la planta y transmite enfermedades. Los

resultados son defoliación, marchitamiento de brotes y ramas jóvenes e incluso la muerte del culmo.

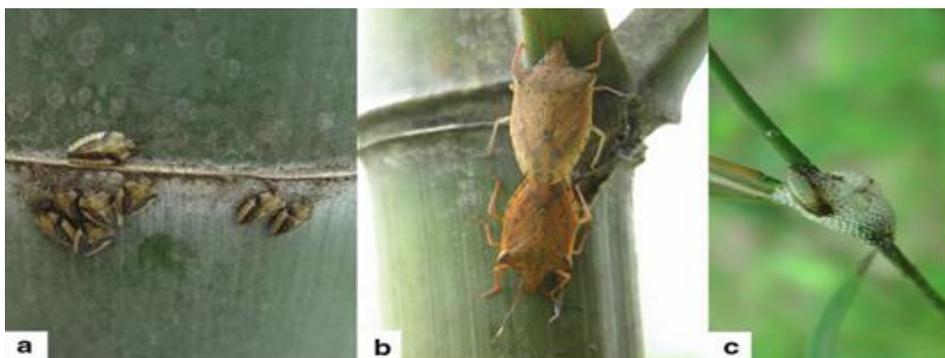


Figura 18: Síntomas de daño de insecto y froghopper. a) *Hippotiscus dorsalis*; (b) *Brachymna tenuis*; (c) *Aphrophora horizontalis*.

7.2. Enfermedades del bambú

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

8. Técnicas de cultivo

8.1. Preparación de suelo

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

8.2. Marco de plantación

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

plantación deben considerarse además los criterios ecológicos, fisiológicos, de mantenimiento de la plantación incluyendo, el orden de prioridad y el control de plagas (Mercedes, 2006).



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

8.3. Tecnología de fertilización

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

8.4. Tecnología de propagación y plantación

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

8.4.1. Reproducción por cortes del rizoma

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

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



Figura 20. Rizomas de bambú a) *Guadua angustifolia*; b) *Dendrocalamus asper*. Fuente: Forest Bambú Perú. Trillo 2019

8.4.2. Propagación por sección de tallos

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

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

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



Figura 20. Sembrado de secciones de tallo a) *Guadua angustifolia*; b) *Dendrocalamus asper*
Fuente: Forest Bambú Perú. Trillo 2019

Método de siembra de tallo

A diferencia del método anterior, se entierra el tallo entero sin dividirlo.

Los pasos son:

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

Método de chusquines

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



Figura 20. Mata de chusquines b) deshije de chusquines

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

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

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

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

Método de las ramas basales

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



Figura 21. a) Planta madre de *Guadua angustifolia*. b) Explantes acondicionados con yemas semi diferenciadas c) Desinfección del explante d) Aplicación de enraizador e) Siembra del esqueje f) Esqueje enraizado. Fuente: Corporación autónoma regional del valle del cauca Oficina de gestión ambiental territorial centro sur. Castaño 2018.

Propagación invitro

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

Disponibilidad de material vegetal y acondicionamiento de explantes

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



Fig. a) Planta madre de *Guadua angustifolia*. b) Explantes acondicionados con yemas semi diferenciadas. Fuente: Propagación, Manejo y Silvicultura. Revista Bambucyt. 01.Corrales. 2018

8.5. Sistema de riego

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

8.6. Poda

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

8.7. Tecnología de cosecha

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

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

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

8.8. Tala

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

El sistema existente de prácticas de tala en bambúes forestales se está trabajando en un Rotación de 3 a 4 años. Los bosques de bambú se dividen en 3 o 4 bloques, y el corte es restringido a un

bloque cada año. Incluso en áreas donde las talas no reguladas tienen llevado durante años, descansar durante unos años permite que el grupo de bambú se recupere, de ahí la necesidad de seguir los requisitos de la silvicultura para el desarrollo sostenible de un grupo.

9. Estudio económico

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

Tabla 3. Precios unitarios de instalación de plántones de bambú

AÑO 0						
ACTIVIDAD	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO S/.	COSTO TOTAL S/.		
ADQUISICIÓN DE PLANTONES Y TRASLADO						
Insumos						
Plantones de Guadua angustifolia + 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 / 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	ud	4	9.5	S/38.00		
Lampa	ud	4	65	S/260.00		
Lima triangular	ud	2	8	S/16.00		
Pico	ud	2	23	S/46.00		
Wincha 50m.	ud	1	120	S/120.00		
Cordel	m	1	20	S/20.00		
Insecticida	ml	1	120	S/120.00		
Abono NPK (20-20-20)	Kilo	5.1	2.5	S/12.76		
Compost y/o humus (Saco de 50kg)	Sacos	16.33	25	S/408.16		
Sub total de costos 2				S/1,040.92		
TOTAL				S/2,590.92		

Tabla 4. 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

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

ACTIVIDAD	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO S/.	COSTO TOTAL S/.
MANEJO SILVICULTURAL/LABORES CULTURALES				
Herramientas depreciación 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

Tabla 6. 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 1año				
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

Tabla 7. 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 1año				
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 fertilizar3 veces/año	Jornal	18	50	S/900.00
Sub total de costos 1				S/3,365.00
TOTAL PRODUCCIÓN				S/3,524.00

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

ACTIVIDAD	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO S/.	COSTO TOTAL S/.
MANEJO SILVICULTURAL/LABORES CULTURALES				
Herramientas depreciables a 1año				
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
GRISTRO 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

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

ACTIVIDAD	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO S/.	COSTO TOTAL S/.
MANEJO SILVICULTURAL/LABORES CULTURALES				
Herramientas depreciables a 1año				
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

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

ACTIVIDAD	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO S/.	COSTO TOTAL S/.
MANEJO SILVICULTURAL/LABORES CULTURALES				
Herramientas depreciables a 1 año				
Mantenimiento de motosierra	Glb	1	300	S/300.00
Sub total de costos 1				S/300.00
Mano de obra				
limpieza y desrame	Jornal	5	50	S/250.00
Cosecha 8 cañas /planta	Jornal	20	50	S/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

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

ACTIVIDAD	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO S/.	COSTO TOTAL S/.
MANEJO SILVICULTURAL/LABORES CULTURALES				
Herramientas depreciables a 1 año				
Mantenimiento motosierra	Glb.	1	200	S/200.00
Sub total de costos 1				S/200.00
Mano de obra				
limpieza y desrame	Jornal	5	50	S/250.00
Cosecha 10 cañas /planta	Jornal	20	50	S/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

Tabla 12. Resumen de costo de producción de bambú en 1 hectárea

ANÁLISIS DE COSTO DE PRODUCCIÓN DE BAMBÚ EN 1 HECTÁREA									
GASTOS/EGRESOS PROYECTADOS									
RUBRO	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	
Plantación de 7 m. x 7 m. es decir 204 plantas por Ha.	S/. 5,994.92	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									
RUBRO	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7 a más	TOTAL
Plantación de 7 m. x 7 m. es decir 204 plantas por Ha.	S/. -	S/. -	S/. -	S/. -	S/. 2,448.00	S/. 8,160.00	S/. 16,320.00	S/. 20,400.00	S/. 47,328.00
Producción/Planta	0	0	0	0	2	5	8	10	
Producción/Ha.	0	0	0	0	408	1020	1632	2040	
PrecioPromedio					S/. 6.00	S/. 8.00	S/. 10.00	S/. 10.00	

8. Características energéticas del bambú *Guadua angustifolia* Kunth

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

Tabla 13. Características energéticas del eucalipto. Fuente: Cesare et al. Avances de la Ciencia e Ingeniería. 2019

Poder calorífico	19,7 MJ/kg
Densidad a granel con P15	0,13 t/m ³
Porcentaje de cenizas	3.19 %
Porcentaje de Volátiles	76,4 ± 0,6 %
Porcentaje de carbono fijo	9,3 ± 0,6 %
Contenido en C	45,7 ± 0,6 %
Contenido de H	6,0 ± 0,1 %
Contenido en N	0,33 ± 0,05 %
Contenido en S	0,15 ± 0,06 %

9. Conclusiones

En las plantaciones energéticas de bambú se pueden obtener producciones entre 16 y 21 t/ha de materia seca. El precio de mercado se sitúa alrededor de 129,5 \$/t. El coste de la producción se sitúa en 23,630 \$/ha, obteniendo un beneficio de 80 \$/t o 1600,5 \$/ha.

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

Referencias

- Akinlabi, E., Anane-Fenin, K., Akwada, D. 2017. Properties of Bamboo. (eds) Bamboo The Multipurpose Plant. Springer International Publishing, Switzerland. pp. 87-149.
- Bamboo Phylogeny Group [BPG] 2012 An updated tribal and subtribal classification of the bamboos (Poaceae: Bambusoideae). In: Gielis J, Potters G (eds) Proceedings of the 9th world bamboo congress, Antwerp, Belgium, 10–12 Apr 2012, pp 3–27
- Banik, RL. 2015. Morphology and growth. In: Liese W, Kohl M (eds) Bamboo: the plant and its uses. Springer International Publishing, Switzerland, pp 43–87
- Centro de Investigación sobre la Desertificación y Fundación AVSI. 2017. Manual Técnico del Bambú para Productores (*Guadua angustifolia* Kunth). Lima, Perú. 88 p.
- Césare, MF., Hilario, F., Callupe, N , Cruz,L., Calle, JL.; Gonzales, H. 2018. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y FÍSICA DEL BAMBÚ. Revista avances en Ciencias e Ingeniería 10(4): 1-13
- Guerreiro, C. 2013. Flowering cycles of woody bamboos native to southern South America. Journal of Plant Research, 127(2), 307–313. doi:10.1007/s10265-013-0593-z
- Huang, Z. 2019. Application of Bamboo in Building Envelope, Green Energy and Technology. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12032-0_1

- INBAR. International Network for bamboo and rattan. 2013. Estudio de la cadena desde la producción al consumo del bambú (*Guadua angustifolia*) en Perú. Quito, Ecuador. 180 p.
- INBAR. International Network for bamboo and rattan. 2013. Estudio de la vulnerabilidad del bambú (*Guadua angustifolia*) al cambio climático en la costa del Ecuador y norte Perú. Quito, Ecuador. 135 p.
- Liese, W., Kohl, M. 2015. Bamboo, Tropical Forestry 10. DOI 10.1007/978-3-319-14133-6_10
- Londoño, X. 2011. El bambú en Colombia. *Bioteología Vegetal*, 11(3). Recuperado de <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/485/882>
- López, A. 2011. Bambú: Biología, cultivo, Manejo y usos en el Perú. Dirección General de la Competitividad Agraria. #ra. Edición. 68 p.
- Mercedes, José R. 2006. Guía Técnica Cultivo del Bambú. Santo Domingo, República Dominicana. CEDAF, 2006. 38 p.
- Ortiz, Rodríguez. 2018. Caracterización y clave de identificación de los bambúes en la región nor-oriental (San Martín, Amazonas y Cajamarca). *Revista BAMBUCYT. Bambú para la ciencia, innovación y tecnología*. N° 01.
- Paucar, R. Llerena L. 2018. Manual técnico de la caña Guayquil (*Guadua angustifolia*): Sistematización de experiencias en la Región Piura.
- Romero, H. 2015. Producción de gas de síntesis (gasificación de bambú). Instituto Nacional de Electricidad y Energía Limpia. Boletín IIE. pp 80-85.
- Xu, TS., Wang, H. 2004. Main pests of bamboo in China. Chinese Forest Publish House, Beijing, pp 45–46
- Zhou, C., Wu, XQ., Ji J., Ye, JR. 2010. Research advances of bamboo diseases. *China For Sci Technol* 24(5):8–13

Caña de azúcar en Paraguay

Lisa María Lovera-Rivas¹; Hugo Ariel Ramirez-Mereles²

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

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

Correponging Author: Lovera-Rivas, L.M. lisalovera@hotmail.com

1. Caña de azúcar en Paraguay

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

Según el último Censo Agropecuario Nacional (2008), la superficie cultivada de caña de azúcar alcanza las 100.000 hectáreas, distribuidas en más de 50.000 fincas en todo el país y se cultiva principalmente como materia prima para la producción de azúcar, forraje, aguardiente y alcohol carburante, constituyéndose el etanol de caña en fuente alternativa y renovable de energía para el país.

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

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

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



Figura 1. Plantación de caña de azúcar

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

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

Los tallos son cilíndricos, erectos, fibrosos y compuestos de nudos y entrenudos, la altura varía desde 1,0 hasta 5,0 m, y el diámetro varía de 1,0 cm a 5,0 cm. La hoja de la caña de azúcar, después de desarrollada, consiste en una lámina y vaina que rodea al tallo, distribuyéndose en forma alternada y opuesta.

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

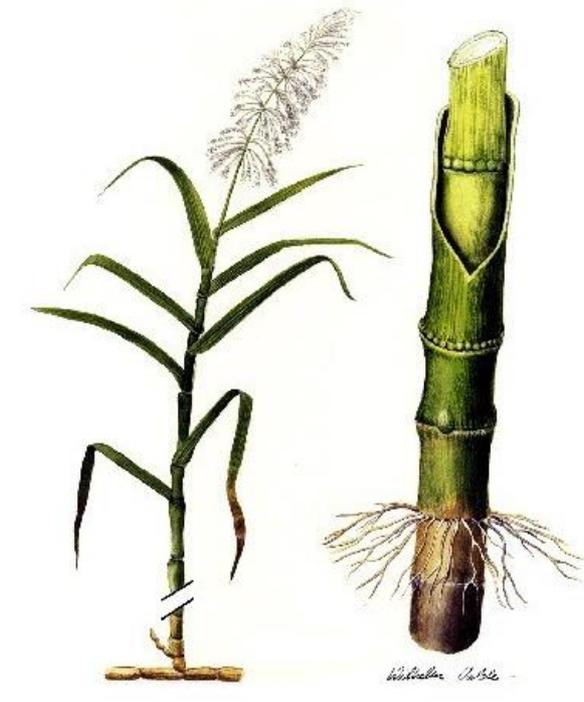


Figura 2-a Raíz y tallo



Figura 2-b Tallo

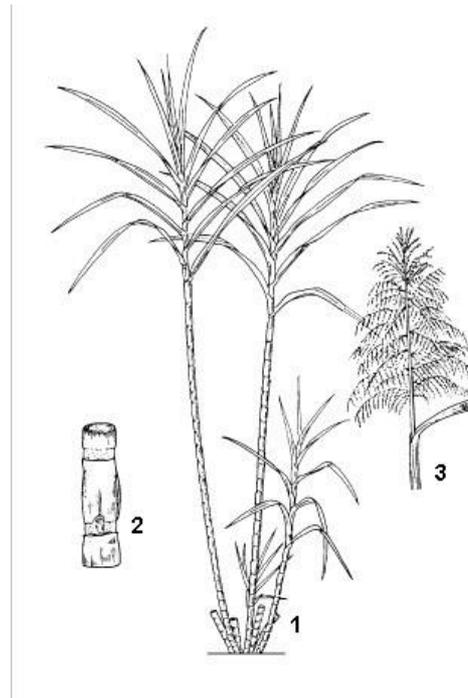


Figura 2. Partes de la caña de azúcar – raíz, tallo y hoja

2. Distribución

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

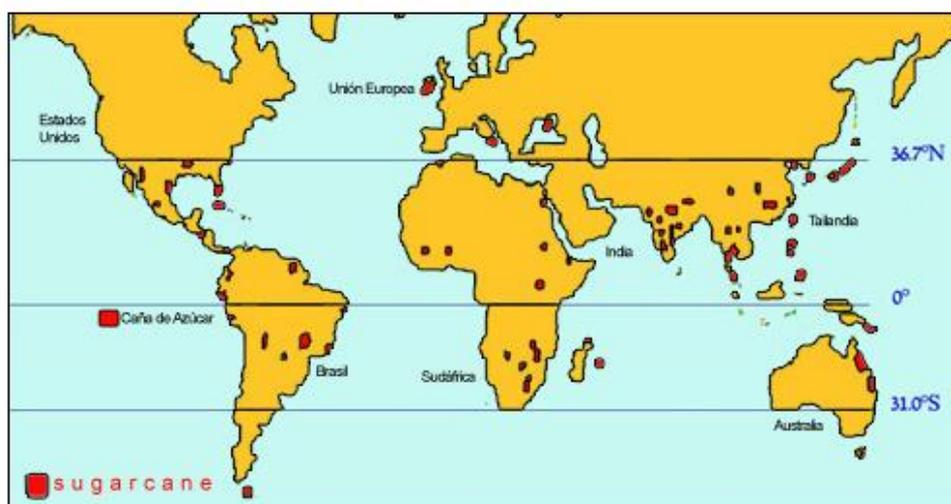


Figura 3-a. Producción de caña de azúcar en el mundo

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

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

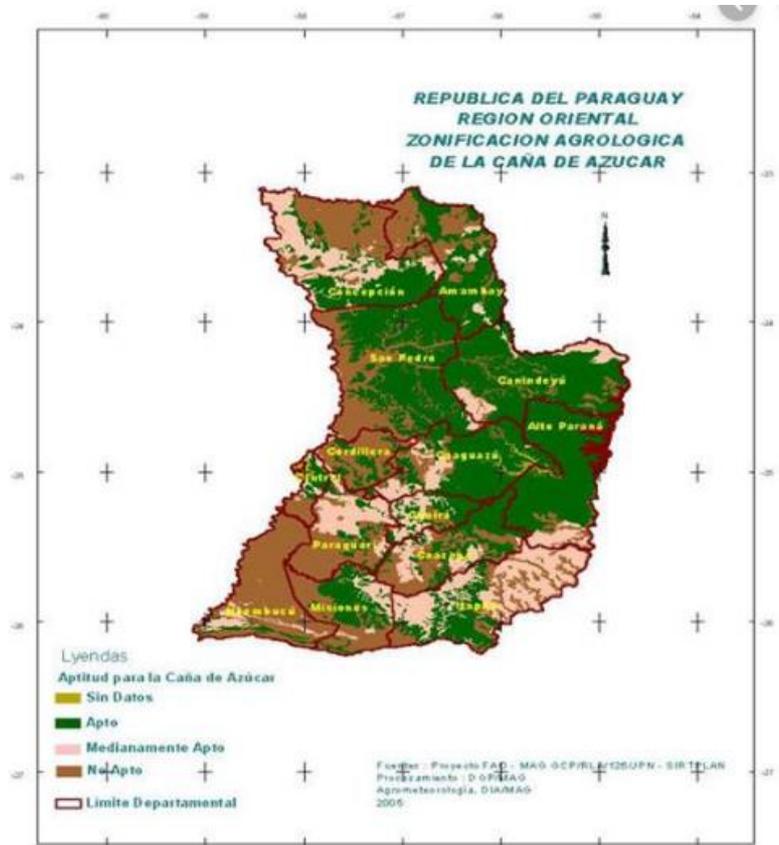


Figura 3-b. Potencial para el cultivo de caña de azúcar en Paraguay





Figura 4 Campo experimental Natalicio Talavera, Departamento del Guaira

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

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

3. Exigencias del cultivo

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

3.1 Clima

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

Temperatura

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

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

Precipitación

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

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

Luz solar

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

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

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

3.2 Suelo

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

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

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

4. Estadios fenológicos

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

Variedades por época de maduración:

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

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

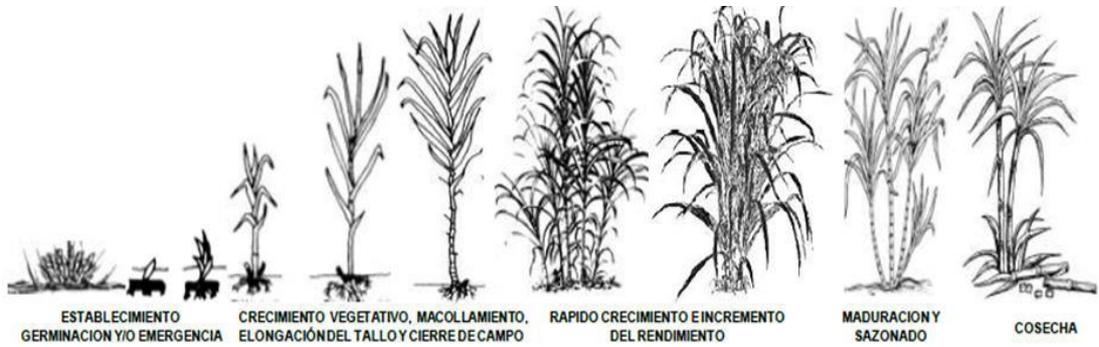


Figura 5 Etapas fenológicas del cultivo de caña de azúcar

5. Principales enfermedades y plagas

Plagas

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

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

Tratamiento: Manejo integrado de plagas, control biológico.



Figura 6. Broca de tallo

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

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

Enfermedades

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

Carbón

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

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

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



Figura 7. Carbón

Roya

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

Puede reducir el 45% de la productividad.

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



Figura 8. Roya

Escaldadura

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



Figura 9. Escaldadura

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

Raquitismo de la soca

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

Tratamiento: Termoterapia, sumergir las estacas en agua a 50,5°C por 2 horas para eliminar la bacteria, limpieza de herramientas e implementos agrícolas, plantar cultivares tolerantes, usar semillas de calidad y origen conocida;



Figura 10. Raquitismo de la soca

6. Técnicas de cultivo

6.1 Preparación del suelo

Se desarrollan tres tipos de prácticas de preparación de suelos para el cultivo:¹

¹ FAO-MAG. (2018). Sostenibilidad de la biomasa forestal para energía y del etanol de maíz y caña de azúcar en Paraguay.

1. La preparación a tracción animal: involucra una carpida del terreno aproximadamente dos meses antes de la implantación del cultivo, una arada incorporando los residuos vegetales, aproximadamente un mes antes de la plantación y el surcado de plantación (35 cm profundidad), inmediatamente después de la arada.

2. La preparación mecanizada: consiste en general; en una carpida, aproximadamente dos meses antes de la implantación del cultivo; una rastrojada, incorporando las malezas en el suelo un mes antes de la plantación; y una arada (rastrón o arado de discos), incorporando los residuos vegetales, aproximadamente un mes antes de la plantación. Finalmente se hace el surcado para plantación (35 cm de profundidad) con surcadora o arado de discos.

3. La labranza mínima mecanizada sobre barbecho o sobre abono verde: consiste en una carpida o rollo cuchillo aproximadamente un mes antes de la plantación; desecar o carpir la vegetación remanente, aproximadamente una semana después de la carpida de las malezas o los abonos verdes con pre o post emergente (herbicidas); y surcado de plantación con surcadora o arado.

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

6.2 Plantación

El sistema de plantación manual es el más frecuente realizado en el país, y de reciente difusión y aplicación el sistema mecanizado, ambos sistemas aplican estrategias de fertilización.²

Plantación Manual

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

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

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

² Espinoza, F. (2019). Manual técnico. Caña de azúcar



Figura 11. Trabajos de plantación manual

Plantación mecanizada

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

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

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

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

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

6.3 Fertilización

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

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

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

Uso de abonos verdes

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

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

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



Figura 12. Abonos verdes

Fertilización orgánica

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

Tabla 1 resumen de labores agronómicas para producción de caña de azúcar ³

Actividades	Año				
	1	2	3	4	5
Preparación de suelo					
Arada	X				
Rastreada	X				
Aplicación de fertilizante cal agrícola	X				
Aplicación de fertilizante NPK	X				
Surcado	X				
Plantación	X				

³ FAO-MAG. (2018). Sostenibilidad de la biomasa forestal para energía y del etanol de maíz y caña de azúcar en Paraguay.

Cuidados culturales					
Aplicación insecticidas	X	X	X	X	X
Aplicación de herbicidas	X	X	X	X	X
Desmalezado mecánico		X	X	X	X
Acondicionamiento de rastrojos, desaporque, otros		X	X	X	X
Aplicación de fertilizante NPK		X	X	X	X
Aplicación de fertilizante estiércol		X	X	X	X
Aplicación de vinaza	X	X	X	X	X
Cosecha					
Corte					X
Transporte a la planta de procesamiento	X	X	X	X	X

7. Estudio económico

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

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

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

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

En la siguiente tabla se puede observar el resultado de análisis de costos de producción realizado dentro del proyecto: 14-inv-122⁴

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

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

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

⁴ Proyecto: 14-inv-122 Rentabilidad de rubros agrícolas conectados a mercados internacionales en los dos estratos de la agricultura paraguaya: empresarial y familiar. FCA-UNA/CONACYT.

Rendimiento

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

Precio de venta

Actualmente, el precio de la caña de azúcar es de aproximadamente 30 \$/t.⁵

8. Características energéticas

Tabla 3. Composición general de la caña de azúcar

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

9. Conclusiones

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

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

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

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

⁵ <https://www.abc.com.py/nacionales/precio-de-cana-dulce-no-variara-1816749.html>
<https://www.abc.com.py/especiales/remiandu/onepyr-takuare-zafra-1825858.html>

Referencias

Duarte, O., Gonzalez, J. (2019). Guía técnica. Cultivo de caña de azúcar

Espinoza, F. (2019). Manual técnico. Caña de azúcar

FAO-MAG. (2018). Sostenibilidad de la biomasa forestal para energía y del etanol de maíz y caña de azúcar en Paraguay.

SAGARPA. Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. (2015). Ficha técnica del cultivo de la caña de azúcar.

Internet

www.ssme.gov.py

www.mag.gov.py

www.mic.gov.py

www.ipta.gov.py

www.petropar.gov.py

www.agr.una.py

www.abc.com.py