



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ciencias Forestales - Programa de Doctorado en Ciencias Forestales



**EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE BIOMASA AÉREA EN
REBROTOS DE CEPAS DE DOS AÑOS EN CULTIVOS DENDROENERGÉTICOS**

Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Forestales

JULIO CESAR RIOS SAUCEDO
CONCEPCIÓN-CHILE
2017

Profesor Guía: Eduardo Acuña Carmona
Dpto. de Manejo de Bosques y Medio Ambiente
Facultad de Ciencias Forestales
Universidad de Concepción

**EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE BIOMASA
AÉREA DE REBROTOS EN CEPAS DE DOS AÑOS EN CULTIVOS
DENDROENERGÉTICOS**

Comisión Evaluadora:

Eduardo Acuña Carmona (Profesor guía)
Ingeniero Forestal, Dr.

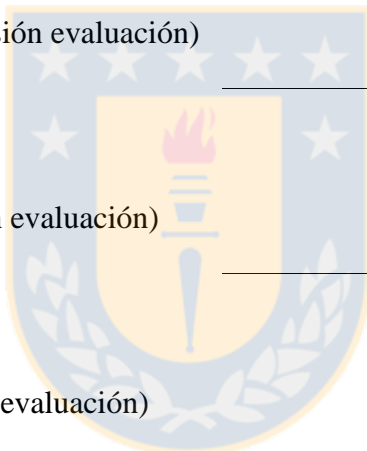
Jorge Cancino Cancino (Comisión evaluación)
Ingeniero Forestal, Dr.

Rafael Rubilar Pons (Comisión evaluación)
Ingeniero Forestal, Ph.D.

Javier Corral Rivas (Comisión evaluación)
Ingeniero Forestal, Dr.

Director de Postgrado:
Regis Marcelo Teixeira Mendonça
Ingeniero Químico, Dr.

Decano Facultad de Ciencias Forestales:
Jorge Cancino Cancino.
Ingeniero Forestal, Dr.



DEDICATORIA



AGRADECIMIENTOS



TABLA DE CONTENIDO

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÍNDICE DE TABLAS..... | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | viii |
| RESUMEN GENERAL | ix |
| I. INTRODUCCIÓN GENERAL..... | 1 |
| HIPÓTESIS GENERAL | 5 |
| OBJETIVO GENERAL | 5 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 6 |
| II. METODOLOGÍA GENERAL | 7 |
| Características y ubicación de los ensayos | 7 |
| Diseño experimental | 8 |
| Medición de variables..... | 9 |
| III. Supervivencia y características de los rebrotes en cepas de dos años de cultivos dendroenergéticos | 11 |
| Resumen | 11 |
| Introducción..... | 12 |
| Metodología..... | 14 |
| Resultados y Discusión..... | 15 |
| Conclusiones..... | 21 |
| Referencias | 23 |
| IV. Modelos alométricos para estimar biomasa aérea en rebrotes de cepas de dos años en tres cultivos dendroenergéticos | 26 |
| Resumen | 26 |
| Introducción..... | 27 |
| Metodología..... | 28 |
| Resultados..... | 31 |
| Discusión | 39 |
| Conclusiones..... | 41 |
| Referencia..... | 42 |
| V. Crecimiento y rendimiento de biomasa aérea en rebrotes de tres cultivos dendroenergéticos | 45 |
| Resumen | 45 |
| Introducción..... | 46 |
| Metodología..... | 47 |
| Resultados..... | 49 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Discusión | 55 |
| Conclusión | 58 |
| Referencias | 59 |
| VI. Ecuaciones alométricas de uso común para estimar biomasa en rebrotes de especies dendroenergéticas de corta rotación-una revisión | 65 |
| Resumen | 65 |
| Introducción..... | 66 |
| Metodología..... | 67 |
| Resultados y Discusión..... | 68 |
| Conclusiones..... | 74 |
| Referencias | 76 |
| VII. Dinámica de brotación y densidad básica de la madera en rebrotes de tres especies dendroenergéticas | 80 |
| Resumen | 80 |
| Introducción..... | 81 |
| Materiales y métodos..... | 82 |
| Resultados y Discusión..... | 85 |
| Conclusiones..... | 90 |
| Referencias | 91 |
| VIII. CONCLUSIONES GENERALES | 94 |
| Referencias generales | 96 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. | Valores promedio y significancia estadística de variables evaluadas según sitio, especie y densidad de plantación..... | 17 |
| Tabla 2. | Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste en el modelo alométrico general (Modelo 1) para la estimación de biomasa aérea total y de componentes (tallo, rama y hojas) en rebrotes, de las tres especies estudiadas. | 33 |
| Tabla 3. | Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste en el modelo alométrico empírico (Modelo 2) para la estimación de biomasa aérea total y de componentes en rebrotes de A. dealbata. | 35 |
| Tabla 4. | Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste en el modelo alométrico empírico (Modelo 3) para la estimación de biomasa aérea total y de componentes en rebrotes de E. denticulata y E. globulus. | 35 |
| Tabla 5. | Parámetros estimados en los modelos alométricos empíricos (Modelos 6, 7 y 8) con el uso de variables dummy para estimar biomasa aérea total y de componentes en rebrotes de A. dealbata. | 36 |
| Tabla 6. | Parámetros estimados en los modelos alométricos empíricos (Modelo 9 y 10) con el uso de variables dummy para estimar biomasa total y de componentes en rebrotes de E. denticulata..... | 37 |
| Tabla 7. | Parámetros estimados en el modelo alométrico empírico (Modelo 11) con el uso de variables dummy para estimar biomasa total y de componentes en rebrotes de E. globulus. | 38 |
| Tabla 8. | Probabilidades obtenidas del análisis de varianza para los efectos evaluados en la biomasa aérea total y por competentes, número de rebrotes, diámetro y altura..... | 49 |
| Tabla 9. | Crecimiento y rendimiento promedio de biomasa obtenida transcurrido 31 meses de edad de los cultivos, según componente, densidad de plantación, especie y variables de estado. | 50 |
| Tabla 10. | Número de publicaciones relacionadas a la estimación de biomasa en rebrotes, recopiladas según concepto, palabra clave y base de datos consultada. | 68 |
| Tabla 11. | Modelos alométricos utilizados en la estimación de biomasa en SRC, género, longitud de rotación, país y fuente, encontrados en la revisión bibliográfica. | 71 |
| Tabla 12. | Número de rebrotes proventicios y adventicios en cepas de tres especies dendroenergéticas evaluadas en tres fechas y densidades de plantación. | 88 |
| Tabla 13. | Valores medios para la densidad básica de rebrotes en tres especies con potencial dendroenergético establecidas en tres densidades de plantación..... | 89 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. | Ubicación geográfica de los sitios de ensayo. | 7 |
| Figura 2. | Distribución y diseño de las unidades experimentales en los sitios de estudio: a) Parcelas Collupilli y La Aguada, b) Pilpilco abajo, cada color representa una frecuencia de corte (1, 2, 3 y 4 años), las letras (A, B y C) representa las especies y los números (5,10 y 15) la densidad de plantación, las plántulas utilizadas del género <i>Eucalyptus</i> fue con selección genotípica a nivel familia con una viverización de 10 meses y las de <i>A. delabata</i> fue sin selección genotípica con 24 meses de viverización..... | 8 |
| Figura 3. | Supervivencia observada en cepas de dos años y cepas rebrotadas en diferentes especies vegetales, densidades de plantación y sitios..... | 16 |
| Figura 4. | Número de rebrotes adventicios y proventicios, según especie y densidad de plantación..... | 20 |
| Figura 5. | Diagrama de caja del número de rebrotes adventicios (A) y proventicios (P) en tres edades (10, 21 y 31 meses) en cepas de tres especies vegetales y densidades de plantación. La línea continua muestra el valor medio, los extremos de las columnas los límites de los datos, la línea de desviación es el tercer cuartil, la línea de abajo representa el primer cuartil y los puntos muestran los valores atípicos. | 32 |
| Figura 6. | Dispersión de los datos observados de biomasa aérea total y de componentes (tallo, ramas y hojas) en rebrotes y línea de tendencia en función del modelo de regresión ajustado..... | 34 |
| Figura 7. | Evolución del rendimiento de biomasa en rebrotes de cepas de dos años en cultivos dendroenergéticos..... | 51 |
| Figura 8. | Particionamiento de la biomasa por hectárea en cultivos dendroenergéticos manejados a partir de rebrotes..... | 53 |
| Figura 9. | Supervivencia observada en los cultivos dendroenergéticos de árboles uni-fustales y cepas rebrotadas (rebrotos)..... | 55 |
| Figura 10. | Longitud de rotación por género registrada en cada estudio. La línea segmentada representa la edad promedio, la línea continua la mediana, los extremos de las columnas, los cuartiles del 25 y 75%, y las barras de error, la desviación estándar..... | 70 |

RESUMEN GENERAL

Los cultivos energéticos leñosos y perennes de corta rotación a partir de rebrotes, se prevé que sea un componente esencial en la producción de biomasa con fines energéticos. Este trabajo de investigación presenta resultados de crecimiento y rendimiento de biomasa con fines dendroenergéticos, en un sistema de monte bajo, alcanzados en los primeros 31 meses de crecimiento, en cepas de dos años. Se estudió *Eucalyptus globulus*, *E. denticulata*, *E. nitens* y *Acacia dealbata*, en tres densidades de plantación (5000; 10000 y 15000 árboles ha⁻¹). Se detectó diferencias significativas en el tiempo, la especie y densidad de plantación en la producción de biomasa y características de estado. La especie *E. globulus* reportó el mayor rendimiento en biomasa total, alcanzando valores de 32.4, 36.0, 41.9 toneladas ha⁻¹ en los 31 meses de crecimiento para las densidades de plantación de 5000, 10000 y 15000 árboles ha⁻¹, respectivamente. La partición porcentual muestra una tendencia similar en las tres especies, el fuste es el componente de la cepa que aporta la mayor cantidad de biomasa a nivel de hectárea hasta un 63% de su biomasa total, seguido por las hojas y las ramas. En rebrotes, la menor tasa de mortalidad de las tres especies estudiadas fue en la densidad de 15000, donde *E. globulus* alcanzó hasta un 84% de supervivencia en rebrotes en cepas de dos años, seguido por *A. dealbata* (65%) y *E. denticulata* (60%). La gestión de cultivos dendroenergéticos de corta rotación a partir de rebrotes, puede ser una estrategia para producir biomasa después del primer ciclo de corta de árboles uni-fustales y evitar los costos de replantación.

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

La necesidad creciente de más energía, provocada por el crecimiento exponencial de la población mundial, está conduciendo rápidamente al agotamiento de los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), lo cual es uno de los principales problemas que enfrenta la sociedad a nivel global (Sandoval 2011). Algunos autores indican que la producción máxima de combustibles fósiles registra una caída continua. Otros autores han mencionado que la mayor producción de petróleo ya ha ocurrido, o que se producirá en pocos años más (Deffeyes 2005). Según la IEA (2006), la producción mundial de petróleo debiera aumentar 60% en los próximos 25 años para lograr abastecer los requerimientos energéticos mundiales; entre el 2010 y 2020, la disminución en la producción de petróleo podrá ser compensada por gas natural, carbón, energía eólica, hidráulica y por la proveniente de biomasa, mientras que desde el 2020 el déficit energético sólo se compensará a partir de fuentes de energías renovables.

En Chile, la elevada tasa de crecimiento económico que ha experimentado el país en los últimos años, ha traído consigo un incremento sostenido en el consumo de energía, situación que se espera se mantenga en el tiempo (Morales *et al.* 2015b). Además es un importador neto de gas natural y de carbón mineral, participando en más de un 75% de la cantidad total que requiere el país (Lahsen *et al.* 2015), lo que pudiera generar desequilibrio en el abastecimiento y en los costos de producción de los combustibles fósiles por depender en parte del mercado internacional (O’Ryan *et al.* 2008, Searchinger *et al.* 2008, Wittelsbürger 2007). Para evitar dichas preocupaciones, se está avanzando hacia una matriz energética sustentable, capaz de asegurar la continuidad, calidad y cobertura del suministro de energía, sin generar impactos negativos en el medio ambiente y en la población. Para ello se han promovido activamente el aprovechamiento de las energías renovables no convencionales (ERNC), ampliamente disponibles en el territorio nacional, y mejorar la eficiencia en el uso de la energía (Castillo y Maldonado 2004)

En la actualidad existe un amplio debate sobre la sustitución de energías derivadas de combustibles fósiles por el uso de energías renovables o ERNC como la solar, eólica, geotérmica y la producida por la transformación de biomasa. Este debate nace en vista de los efectos dañinos

generados por el uso de combustibles fósiles sobre el ambiente y por la incertidumbre en la oferta futura de las fuentes convencionales de energía (REN21 2013). En el marco conceptual de producción de biomasa con fines energéticos se encuentran los cultivos dendroenergéticos, como una manera de contribuir a la reducción de los gases de efecto invernadero y de reducir la dependencia energética de combustibles fósiles. Países desarrollados como Suecia, Holanda, Estados Unidos, Italia, y España, cuentan con cultivos dendroenergéticos específicamente concebidos para la producción de biomasa con altas tasas de acumulación anual y cortos períodos de rotación (Dimitriou y Aronsson 2005, Martín 2006, Volk *et al.* 2004).

Chile posee un sector forestal altamente tecnificado y consolidado, que le permitiría en el mediano plazo el autoabastecimiento a partir de biomasa lignocelulósica para la cogeneración de energía (Álvarez y Fuentes 2004, Donoso y Otero 2005, Elizalde y González 2008, Figueroa 2009, Meneses y Guzmán 2000, Wompner 2010), de ahí que en las últimas décadas se han orientado las investigaciones en plantaciones forestales hacia la aplicación de uso energético, tanto de especies nativas como especies introducidas (Morales *et al.* 2015a). La biomasa procedente de especies forestales tiene la ventaja de no poner en riesgo la seguridad alimentaria, al no competir con la oferta de productos para consumo humano como se presenta actualmente con los biocombustibles de primera generación (Montoya 2009, Suárez y Martín 2010). En esa misma dirección, la política ambiental del país incentiva el uso de biomasa en procesos de generación de energía- LEY 20.257 ERNC ABRIL 2008-, lo que disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la quema de combustibles fósiles (Molina y Rudnick 2011). A través de estas leyes, la generación de energía a partir de biomasa presenta una participación creciente, alcanzando el 19,2% de la producción de la matriz energética nacional de consumo primario (Nilsson y Rodríguez 2012, Rodríguez 2011). Actualmente, la oferta de biomasa es a partir de residuos de cosecha o aserrío (Martí 2006, Spatari *et al.* 2010), sin embargo, una estrategia para producir biomasa en grandes cantidades son los cultivos dendroenergéticos (Patiño y Smith 2009).

En el país existen aproximadamente 1,8 millones de hectáreas de suelos considerados de seco, los que si bien tienen restricciones para el crecimiento (i.e. pluviometría concentrada en 3 a 4 meses de invierno y un período de sequía de 7 a 9 meses), pueden ser utilizados para establecer

cultivos dendroenergéticos empleando especies forestales especialmente adaptadas a esta condición (Santelices *et al.* 2013). El establecimiento de cultivos forestales de corta rotación (SRC) para la producción de biomasa podría proporcionar beneficios ambientales y económicos significativos para las comunidades rurales, y para la sociedad en conjunto (REN21 2013). La biomasa forestal es una fuente de energía renovable que puede ser manejada sustentablemente (Richardson y Verwijst 2007); esta sustentabilidad de los cultivos dendroenergéticos depende de varios factores, entre ellos de la economía de la producción de la materia prima, la productividad del sitio y las mejoras en las prácticas silvícolas (Richardson y Verwijst 2007).

El primer factor a considerar en las plantaciones dendroenergéticas es la especie (Mead 2005). Se han evaluado varias especies, entre ellas los *Eucalyptus* spp (Hinchee *et al.* 2009) y *Populus* spp que han demostrado un enorme potencial en los cultivos de corta rotación (Baral y Guha 2004). La elección de la especie debe tomar en cuenta el manejo requerido por ella puesto que pueden causarse pérdidas de carbono del suelo (Carroll y Somerville 2009).

Para la elección de la especie uno de los factores a contemplar es la eficiencia en el uso del agua, principalmente en tierras marginales, la elección de especies C3 están recomendadas para las regiones frías y húmedas (Carroll y Somerville 2009), por ejemplo en el Reino Unido donde se distribuyen ampliamente los sauces (*Salix* spp) (Haughton *et al.* 2009).

Entre los géneros y especies dendroenergéticas más importantes a nivel mundial se encuentran: eucalipto (*E. globulus*, *E. nitens*, *E. robusta*, *E. gomphocephala*, *E. camaldulensis*, *E. rudis*, *E. denticulata*), sauce (*Salix* spp), álamo (*Populus* spp), paulownia (*Paulownia* spp), acacia (*Acacia dealbata*, *A. melanoxylon* y *A. retinodes*) (Camps y Marcos 2002). Estos géneros y especies presentan una alta productividad y pueden promoverse como cultivos de rápido crecimiento y de fácil brotación (SRC) (Blanco *et al.* 2010). El manejo del rebrote es una técnica para incrementar la producción de biomasa después del primer ciclo de corta y evitar los costos de replantación (Sixto *et al.* 2008).

De esta forma, se consideran cultivos energéticos leñosos a aquellos en los que se utilizan especies de crecimiento rápido bajo un sistema de manejo intensivo y con un ciclo de corta que

puede variar entre 1 a 15 años, con mayores densidades de plantación. Esta práctica debería permitir un aprovechamiento ecológico y económicamente óptimo en la producción de biomasa mediante la aplicación de conocimientos biológicos y físicos tanto teóricos como las prácticas silvícolas (Blanco *et al.* 2010).

Una de las herramientas útiles en la evaluación de la estructura y las condiciones de los bosques son los modelos alométricos (Mugasha *et al.* 2013). Estos pueden proporcionar información valiosa sobre la producción y el aprovechamiento de madera industrial y la estimación de biomasa (Mugasha *et al.* 2013). También son relevantes como parte de las aplicaciones del inventario forestal para la evaluación de las estructuras de los bosques, cantidad de carbono secuestrado y la estimación de materia prima para procesos industriales y energéticos. Numerosos modelos alométricos globales de biomasa se han desarrollado en los últimos años, tales como los de África (Henry *et al.* 2011), Europa (Muukkonen y Mäkipää 2006); (Zianis *et al.* 2005) y América del Sur (Návar 2009). Estos comprenden variables de árboles fácilmente mensurables (e.g. el diámetro normal (D) y la altura total del árbol (H)) (Návar 2009) y en ocasiones también se utilizan algunas medidas de la forma de los árboles (Clutter *et al.* 1983), las cuales junto con la densidad de la madera deben relacionarse con la producción de biomasa (Hauk *et al.* 2014). Sin embargo, en los cultivos dendroenergéticos sólo la primera rotación está formada por individuos uni-fustales; a partir del segundo ciclo de cultivo surgen numerosos rebrotes de cada cepa formando individuos poli-fustales; esto presenta desafíos interesantes en la estimación de la biomasa aérea total, o por componentes cuando se requiera. De aquí surge el interés de la presente investigación en evaluar el crecimiento y rendimiento de biomasa aérea en rebrotes de cepas de dos años en cultivos dendroenergéticos de corta rotación.

Este documento consta de ocho capítulos. El primero entrega información acerca de la problemática energética mundial y del ensayo evaluado; aquí además se describen las hipótesis y objetivos del estudio. En el capítulo II de metodología general, se entregan características de ubicación y edafoclimáticas del ensayo evaluado, mencionando además las variables determinadas en cada una de las oportunidades de medición. El capítulo III es un estudio de la supervivencia y las características de los rebrotes en cepas de dos años de cultivos dendroenergéticos. En el capítulo IV se muestran los ajustes de modelos alométricos para la

estimación de biomasa aérea y por componente en rebrotes de *Acacia dealbata*, *Eucalyptus denticulata* y *E. globulus*. El capítulo V habla de la evaluación del crecimiento y rendimiento de biomasa aérea en un sistema de monte bajo. El capítulo VI es una revisión bibliográfica relacionada a las ecuaciones alométricas de uso habitual para estimar biomasa en rebrotes de especies dendroenergéticas de corta rotación. En el capítulo VII, es un estudio de la densidad básica de la madera en rebrotes adventicios y proventicios. Por último, están las conclusiones generales correspondiente al capítulo VIII, el formato de los capítulos III al VII está en función a la revista donde se publicaron y serán sometidos.

HIPÓTESIS GENERAL

-) La respuesta del crecimiento y rendimiento de biomasa aérea en rebrotes de cultivos dendroenergéticos presenta interacción especie-densidad de plantación.
-) Existe una relación directa entre el promedio del diámetro a la altura del cuello, la altura promedio de los dos rebrotes dominantes de la cepa con la biomasa aérea total y por componente (tallo, rama, hojas) en rebrotes de cultivos dendroenergéticos.
-) Existen diferencias estadísticas de la densidad básica de la madera entre los tipos de rebrotes proventicios y adventicios producidos en cepas de cultivos dendroenergéticos.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el crecimiento y rendimiento de biomasa aérea en rebrotes de cepas de dos años en tres especies de cultivos dendroenergéticos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

-) Evaluar la supervivencia y características físicas de los rebrotes en cepas de dos años en *Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *E. denticulata* y *Acacia dealbata*.
-) Desarrollar herramientas predictivas para estimar la producción de biomasa aérea en rebrotes de *E. globulus*, *E. denticulata* y *A. dealbata*.
-) Estudiar en tres periodos de evaluación el crecimiento y rendimiento de biomasa aérea en rebrotes de cepas de dos años en tres cultivos dendroenergéticos.
-) Revisar las especies vegetales, longitud de rotación y tipos de modelos alométricos usados para estimar biomasa en sistemas de monte bajo de corta rotación “SRC”.
-) Determinar la densidad básica de la madera en rebrotes de tres especies dendroenergéticas.



II. METODOLOGÍA GENERAL

Características y ubicación de los ensayos

El estudio se estableció en agosto de 2010 en tres predios con característica edafoclimáticas contrastantes, i.e. Parcelas Collipulli, La Aguada y Pilpilco Abajo (Figura 1). El predio Parcelas Collipulli está ubicado en la comuna de Collipulli, posee suelos del tipo cenizas volcánicas recientes (trumaos), de textura franco-limosa; con temperaturas media mínima y máxima de 4,1 °C y 25,7 °C y, una precipitación media anual de 1354 mm. El predio La Aguada pertenece a la comuna de Yumbel, posee suelos derivados de arenas volcánicas (arenales), de textura franco arenosa; temperaturas medias mínima y máxima de 4,4 °C y 28,6 °C y, una precipitación media anual de 1093 mm (Domingues *et al.*). Pilpilco Abajo pertenece a la comuna de Curanilahue, posee suelos profundos que se formaron sobre sedimentos marinos, de textura franco-arcillosa, con temperaturas media mínima y máxima de 6,0 °C y 23,2 °C y, una precipitación media anual de 1437 mm (Novoa *et al.* 1989).

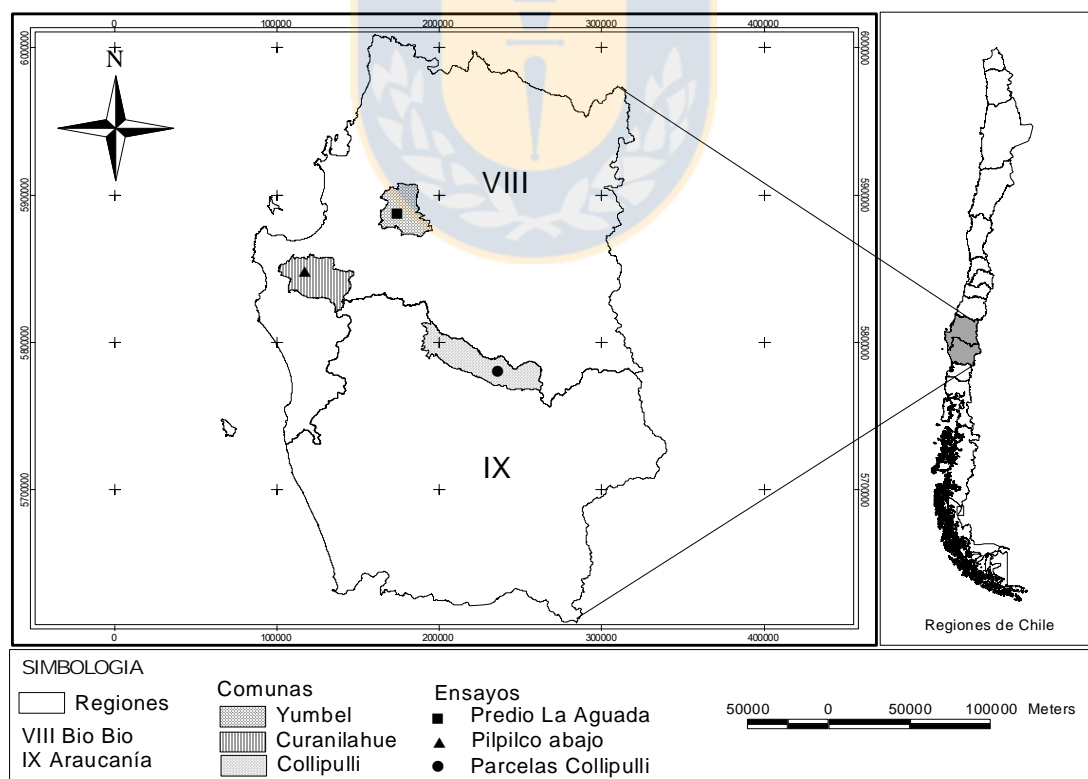
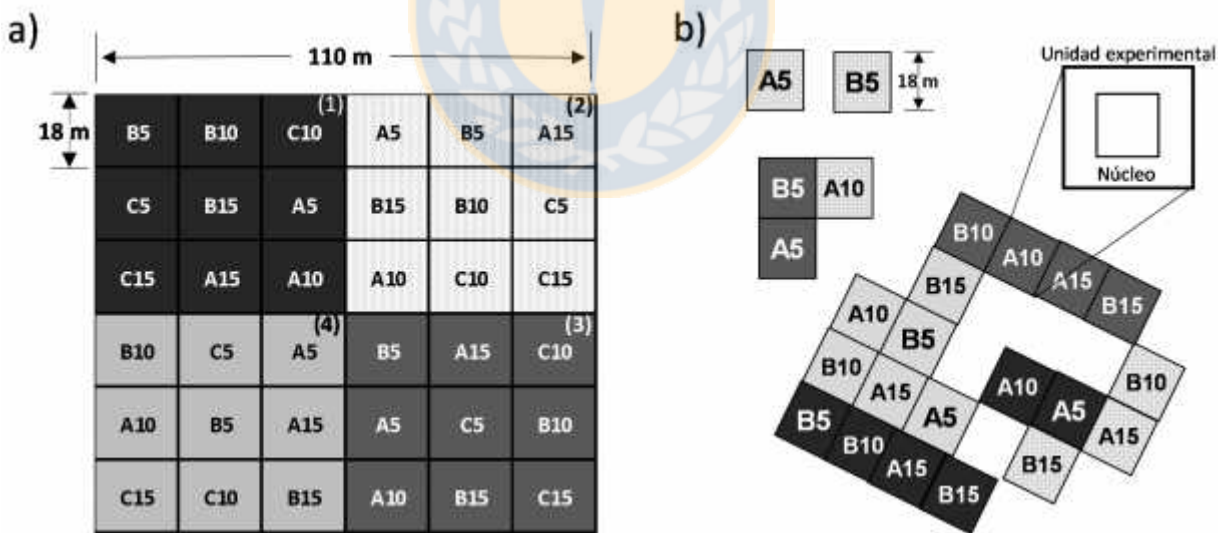


Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de ensayo. Fuente: Elaboración propia.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Para los predios Parcelas Collipulli y La Aguada, cada bloque fue un cuadrado de 110 m de lado (12100 m²), conformado por 4 cuadrantes, cada uno compuesto por nueve unidades experimentales de 25 m por lado (625 m²). Cada unidad, a su vez, consistió en una zona de amortiguamiento para evitar el efecto borde, y un núcleo de 30 árboles útiles; en el predio Pilpilco Abajo, dada la complejidad fisiográfica del terreno, se ubicaron 24 unidades experimentales por bloque, seis unidades por frecuencia de corte (Figura 2). Se plantó un número variable de especies por predio, tres en Parcelas Collipulli (*A. dealbata*, *E. globulus* y *E. nitens*) y La Aguada (*A. dealbata*, *E. globulus* y *E. denticulata*) y dos en Pilpilco abajo (*E. globulus* y *E. nitens*), con tres densidades (5000, 10000 y 15000 árboles ha⁻¹). Las especies arbóreas se manejaron bajo cuatro frecuencias de corte. Cada cuadrante corresponde a una de cuatro frecuencias de corte (cada 1, 2, 3 y 4 años), iniciando la primera intervención al primer año de establecido el cultivo, para este trabajo todos los estudios se realizaron en el cuadrante cosechado en diciembre de 2012 correspondiente a la frecuencia de dos años.



genotípica a nivel familia con una viverización de 10 meses y las de *A. delabata* fue sin selección genotípica con 24 meses de viverización. Fuente: Elaboración propia.

Medición de variables

Para la medición de variables y estimación de biomasa se llevaron a cabo tres evaluaciones octubre de 2013, septiembre 2014 y septiembre 2015. A los diez meses después del corte, se contó el número de cepas rebrotadas dentro del área núcleo (30 cepas) y se registró el número de rebrotes proventicios y adventicios de cada cepa. El tipo de rebrote se definió según sus características físicas y posición; aquellos que brotaron en la corona de la cepa y en posición horizontal fueron identificados como adventicios y aquellos mejor unidos a la planta madre (cepa) y en posición vertical como rebrotes proventicios. Para los atributos del rebrote, se identificaron los dos principales rebrotes proventicios dominantes de cada cepa y se les midió la altura total, el diámetro del cuello a nivel del suelo (D; 0,1 m sobre el suelo) y el diámetro a la altura del pecho (DAP) cuando estos rebrotes alcanzaron 1,3 m, también se midió el diámetro de la copa de todas las cepas en el núcleo de cada unidad experimental.

Los datos utilizados en la elaboración de las funciones de biomasa se recopilaron en las mismas fechas de medición y resultaron de un estudio destructivo de biomasa, de tres cepas seleccionadas de la zona de la mitigación del efecto de borde de cada unidad experimental. Las cepas recolectadas cubren tanto la distribución diametral (D) y de altura total. Estas cepas fueron cortadas a 0,1 m sobre el nivel del suelo, transportados, y se almacenaron a 4 °C. En laboratorio cada muestra se separó por tipo de rebrote y se contaron tanto adventicios como proventicios, se les midió la altura total y el diámetro por sección a lo largo del fuste 10, 50, 100 y 130 cm. Posteriormente los componentes (tallo, rama y hojas) de cada rebrote fueron pesados en verde en una báscula digital de 0,01 g de precisión. Para el peso seco se tomaron muestras de cada componente de hasta 500 gr, esto para obtener el contenido de humedad. El material se secó en una estufa a 105 °C, hasta obtener el peso constante (Brown 1997, Schlegel *et al.* 2000); después, de la razón entre el peso seco y el húmedo se calculó la biomasa seca. La biomasa total por árbol (Brassiolo *et al.*), se obtuvo al sumar la biomasa de todos los componentes.

Para el estudio de la densidad básica, se utilizaron las muestras del estudio destructivo de biomasa de dos fechas de evaluación septiembre del 2014 y septiembre 2015, En cada rebrote se midió la altura total y el diámetro por sección a los 10, 50, 130 cm (diámetro normal o DAP) y luego a cada metro, hasta que se registraron diámetros inferiores a 10 mm. En cada uno de estos puntos marcados a lo largo del fuste se obtuvieron rodela (de 2,5 cm de espesor) que fueron ordenadas y etiquetadas en mallas plásticas, se colocaron en recipientes con agua, hasta su completa sumersión, para de esa forma lograr que el volumen de las rodela sobrepasara el punto de saturación de las fibras. El análisis por sección a lo largo del fuste, fue para obtener el valor promedio ponderado de la densidad básica de cada rebrote.



III. Supervivencia y características de los rebrotes en cepas de dos años de cultivos dendroenergéticos¹

Resumen

Varias especies de los géneros *Eucalyptus* y *Acacia* son adecuadas para la producción de biomasa para generación de energía. El objetivo del presente estudio fue evaluar la supervivencia y atributos de rebrotes en cuatro especies dendroenergéticas. Se estudió *Eucalyptus globulus*, *E. denticulata*, *E. nitens* y *Acacia dealbata*, establecidos en tres predios (Collipulli, Yumbel y Pilpilco) y a tres densidades de plantación (5000, 10000 y 15000 árboles ha⁻¹). El predio Pilpilco mostró el promedio más alto (94%) en la supervivencia al final del primer ciclo de corta, mientras que la mayor brotación de cepas se registró en Collipulli (89%). La especie *E. globulus* fue la que mostró la más alta tasa de supervivencia al final del primer ciclo de corta, así como un alto número de cepas brotadas. Otra especie sobresaliente fue *E. denticulata*. La especie *Acacia dealbata* a pesar de ser reconocida por su capacidad de colonización, mostró alta tasa de mortalidad al final de la primera rotación y problemas en el mantenimiento de los rebrotes debido al consumo ejercido por lagomorfos. Se observaron diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) entre densidades de plantación para la supervivencia registrada al final del primer ciclo de corta y el tratamiento con 5000 árboles ha⁻¹ registró el más alto nivel para esta variable, con 60 a 94% para los diferentes predios. En las cepas rebrotadas, la densidad de la plantación no presentó efecto sobre la supervivencia de los rebrotes, aunque se apreciaron diferencias en el diámetro y altura del rebrote dominante atribuido al factor de densidad de plantación. La especie *Eucalyptus globulus* mostró altas tasas de supervivencia en todos los predios evaluados, por lo que puede ser considerada como una buena opción para la producción de biomasa a partir de rebrotes.

Palabras clave. *Eucalyptus* spp., *Acacia dealbata*, densidad de plantación, bioenergía.

¹ Rios J, J Cancino, E Acuña, R Rubilar, J Corral, R Rosales. 2017. Supervivencia y características de rebrotes en cepas de dos años de cultivos dendroenergéticos. *Ciencia Florestal* (enviado).

Introducción

En la actualidad se buscan fuentes renovables no convencionales para la generación de energía, con el fin de asegurar la demanda energética. Durante los últimos años se incrementó el interés en la generación de energía a partir de la biomasa obtenida de diferentes especies vegetales (McKendry 2002). En algunos países, se ha considerado que las plantaciones comerciales de eucalipto pueden convertirse en un componente de importancia para la producción de biomasa útil en la generación de energía (Turnbull 1999). El eucalipto es un árbol apreciado en el establecimiento de plantaciones forestales por su alta tasa de supervivencia, fácil regeneración y rápido crecimiento (Alonso *et al.* 2008, Garcia y Ruiz 2003). También se incluye entre las plantas arbóreas de mayor importancia mundial para la producción de madera (Ruiz y Lopez 2010).

Las plantaciones de eucalipto han adquirido relevancia y actualmente se estima una superficie mundial de 19 millones de hectáreas destinadas a plantaciones comerciales (Domingues *et al.* 2011). En zonas templadas de Australia y Chile, las especies del género *Eucalyptus* principalmente *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* son preferidas en las plantaciones comerciales (Domingues *et al.* 2011). Otra especie de eucalipto con importancia económica es *Eucalyptus denticulata*, la cual muestra similitud con *Eucalyptus nitens* para algunas características comerciales (Hamilton *et al.* 2011). Se ha demostrado que es posible obtener tasas altas de producción de biomasa en las plantaciones de estas especies con prácticas de silvicultura intensiva (Binkley y Stape 2004). Las especies *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* han sido consideradas como insumos importantes para la generación de energía obtenida a partir de biomasa (Pérez *et al.* 2006).

En Chile, existe interés en el establecimiento de plantaciones de eucalipto para la producción de biomasa con fines energéticos (Geldres *et al.* 2004). La superficie establecida actualmente con plantaciones de eucalipto alcanza 0,7 millones de hectáreas destinadas principalmente a la producción de madera y pulpa (Barros 2013). En este país, los estudios relacionados a sistemas de monte bajo son recientes y se cuenta con poca información sobre el efecto del rebrote en cultivos establecidos en altas densidades. El manejo de rebrotes es una técnica para producir

biomasa después del primer ciclo de corta, evitando los costos de replantación (Sixto *et al.* 2008). También se ha demostrado que, en un periodo menor de 15 años, un rodal en rebrote produce el doble del volumen maderable comparado en una plantación uni-fustal de la misma edad (Silva *et al.* 2011). Además, se evitan algunos de los costos iniciales durante el establecimiento de una plantación.

Para el manejo del monte bajo (rebrotos) de eucalipto, se han generado recomendaciones, entre las que se incluye la necesidad de dejar entre uno y tres rebrotos por tocón preferentemente de tipo proventicios (Geldres *et al.* 2004). Las características de mayor importancia para la evaluación física del rebrote incluyen la medición del diámetro de tocón (Dac), diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total (H). Se recomienda la evaluación de estas características de manera combinada con las variables ambientales y densidad de plantación, con la finalidad de evaluar el crecimiento del eucalipto (Rodríguez 2012).

Algunas especies del género *Acacia* han mostrado potencial para la producción de biomasa, aunque se recomienda un manejo cuidadoso de éstas debido a que, por su gran capacidad de colonización, son consideradas como plantas invasivas. En Chile, la especie *Acacia dealbata* se introdujo como planta ornamental y se dispersó en hábitats ribereños, en sitios ruderales y perturbados (Fuentes *et al.* 2011). En la actualidad, en el país esta especie tiene escasa utilidad para la producción de biomasa dendroenergética, aunque muestra alta eficiencia biológica y productiva (Ferreira *et al.* 2014). Se requiere de estudios para la identificación de especies de rápido crecimiento y eficiencia productiva; así como valores altos de supervivencia en rebrotos, para optimizar la producción de biomasa en cultivos de corta rotación bajo un sistema de monte bajo, para esto. El objetivo del presente estudio fue evaluar la supervivencia y características del rebrote en cepas de dos años de cuatro especies establecidas como cultivos dendroenergéticos.

Metodología

El ensayo se realizó en tres sitios con características edafoclimáticas contrastantes, i.e. Parcelas Collipulli, La Aguada y Pilpilco Abajo. Antecedentes generales de los sitios y del diseño de los ensayos se detallan en el capítulo II.

Evaluación de la supervivencia. A los diez meses después del corte (Octubre 2013), se contó el número de cepas rebrotadas dentro del área núcleo (30 cepas) y se registró el número de rebrotes proventicios y adventicios de cada cepa. El tipo de rebrote se definió según sus características fisiológicas y posición; aquellos que brotaron en la corona de la cepa y en posición horizontal fueron identificados como adventicios y aquellos mejor unidos a la planta madre (cepa) y en posición vertical como rebrotes proventicios. Para los atributos del rebrote, se identificaron los dos principales rebrotes proventicios dominantes de cada cepa y se les midió la altura total, el diámetro del cuello a nivel del suelo (D_{ac} ; 0,1 m sobre el suelo) y el diámetro a la altura del pecho (DAP) cuando estos rebrotes alcanzaron 1,3 m. Se midió el diámetro de la copa de todas las cepas en el núcleo de cada unidad experimental.

Análisis y modelo estadístico. Los datos de supervivencia y atributos del rebrote se utilizaron como variables dependientes para realizar el análisis de varianza (ANOVA) en un diseño de bloques completamente aleatorios y 3 repeticiones. La comparación de medias se obtuvo con base en la prueba significativa honesta de Tukey ($\alpha = 0,05$). El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$y_{ijk} \sim \mu + SP_i + B_j + D_k + SPfDA_{ik} + E_{ijk}$$

$i = 1, \dots, 3; j = 1, \dots, 3; k = 1, \dots, 3.$

Donde, y_{ijk} = valor de la variable dependiente, observado en la especie i , en el bloque j , y densidad k ; μ = es la media general; SP_i = efecto del i -ésima especie; B_j = efecto del j -ésimo bloque; D_k = efecto de la k -ésima densidad; $SPfDA_{ik}$ = efecto de la interacción entre la i -ésima especie y la k -ésima densidad.

Se utilizó la prueba de normalidad Shapiro-Wilks (Mendes y Pala 2003) para comprobar la distribución normal de los residuos del modelo estadístico. El análisis de varianza se obtuvo con el apoyo del programa SAS Versión 9.2 (SAS Institute Inc. 2008).

Resultados y Discusión

En la mayoría de las variables evaluadas se obtuvieron diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) mostrando interacción entre los factores especies y densidades de plantación (Tabla 1 y 2). Transcurridos dos años de establecimiento de la plantación (frecuencia de corte 2 años), dentro de los sitios, Pilpilco Abajo mostró el mayor porcentaje de supervivencia en las especies y densidades evaluadas, con valores entre 92 y 97% para *Eucalyptus nitens* y entre 90 y 93% para *Eucalyptus globulus*. En el sitio La Aguada, *Eucalyptus globulus* fue la especie con mayor porcentaje de supervivencia (91%), en 5000 árboles ha⁻¹, seguida por *Eucalyptus denticulata*, con una media de 75%. En contraste, *Acacia dealbata* fue la especie que presentó el menor porcentaje de supervivencia con valores inferiores a 30% en la mayoría de las densidades de población (Figura 3). En el sitio Parcelas Collipulli, *Acacia dealbata* registró la mayor tasa de supervivencia de cepas en las tres densidades de plantación, con valores entre 70 y 77%. Los eucaliptos -especialmente *Eucalyptus nitens*- mostraron valores de supervivencia similares a los observados en *Acacia dealbata*. En la densidad de 15000 árboles ha⁻¹ se redujo significativamente la supervivencia en *Eucalyptus nitens* (51%) y *Eucalyptus globulus* (48%), en comparación con *Acacia dealbata* (74%). En este sitio, la densidad de 5000 árboles ha⁻¹ fue la que obtuvo el mayor promedio de supervivencia 77% para las tres especies evaluadas, seguido por 10000 árboles ha⁻¹ con 68% (Figura 3, Tabla 1).

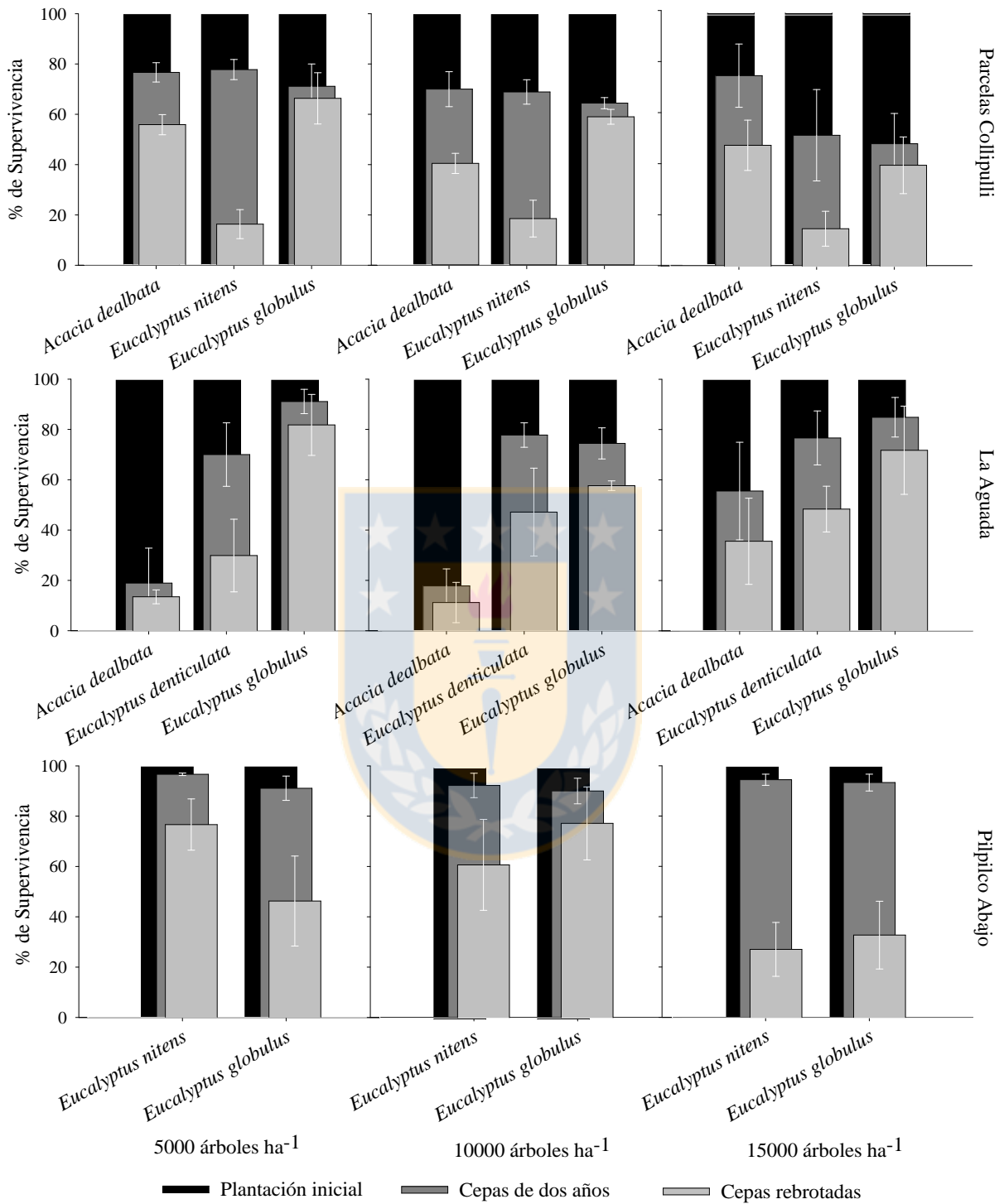


Figura 3. Supervivencia observada en cepas de dos años y cepas rebrotadas en diferentes especies vegetales, densidades de plantación y sitios. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos en Parcelas Collipulli, son consistentes con los reportados por Sandoval (2011), quien evaluó la supervivencia en plantaciones de corta rotación en densidades de 5000, 7500 y 10000 árboles ha⁻¹, encontrando que al incrementar la densidad de plantación aumentó también la mortalidad en los cultivos, esto atribuido a la competencia por espacio y nutrientes del suelo. En contraste en el sitio Pilpilco Abajo, se registró el mayor nivel de supervivencia en todas las densidades de plantación, mostrando igualdad estadística para el porcentaje de supervivencia a los dos años de establecimiento (Tabla 1). Con base en los resultados de supervivencia, puede decirse que este ambiente mostró mayor potencial para la producción de biomasa dendroenergética, especialmente con la utilización de las especies *Eucalyptus nitens* y *Eucalyptus globulus* manejados como plantaciones en altas densidades de corta rotación.

Tabla 1. Valores promedio y significancia estadística de variables evaluadas según sitio, especie y densidad de plantación

| Sitios | | Parcelas Collipulli | | | La Aguada | | | Pilpilco abajo | |
|----------------------------|----------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|
| Variable | Densidad | <i>Ad</i> | <i>En</i> | <i>Eg</i> | <i>Ad</i> | <i>Ed</i> | <i>Eg</i> | <i>Eg</i> | <i>En</i> |
| Supervivencia Cepas (%) | 5000 | 77Aa | 78Aa | 71Aa | 19Aa | 70Ba | 91Ca | 91Aa | 97Aa |
| | 10000 | 70Aa | 69Aa | 64Bb | 18Aa | 78Ba | 74Bb | 90Aa | 92Aa |
| | 15000 | 74Aa | 51Bb | 48Bc | 56Ab | 77Ba | 85Ca | 93Aa | 94Aa |
| Supervivencia Rebrotos (%) | 5000 | 73Aa | 21Ba | 93Ca | 57Aa | 34Ba | 72Ca | 51Aa | 79Ba |
| | 10000 | 58Ab | 27Ba | 91Ca | 63Aa | 61Ab | 77Ba | 69Aa | 53Bb |
| | 15000 | 65Aab | 29Ba | 84Ca | 64Aa | 63Ab | 84Bb | 35Ab | 29Bc |
| No. rebrotos adventicios | 5000 | 6Aa | 8Aa | 12Ba | 2Aa | 4Ba | 10Ca | 8Aa | 8Aa |
| | 10000 | 6Aa | 3Bb | 10Ca | 6Ab | 7Ab | 7Ab | 6Ab | 6Aa |
| | 15000 | 7Aa | 3Bb | 7Cb | 12Ac | 8Bb | 8Bb | 8Aa | 7Aa |
| No. rebrotos proventicios | 5000 | 5Aa | 2Ba | 8Ca | 5Aa | 5Aa | 6Aa | 7Aa | 4Ba |
| | 10000 | 5Aa | 3Aa | 7Bab | 5Aa | 5Aa | 5Aa | 6Aab | 4Aa |
| | 15000 | 5Aa | 3Ab | 6 Ab | 6Aa | 5Aa | 5Aa | 5Ab | 4Aa |
| Dac (mm) | 5000 | 8.9Aa | 8.7Aa | 12.3Ba | 18.7Aa | 19.6Aa | 20.0Aa | 13.2Aa | 10.9Aa |
| | 10000 | 8.9Aa | 6.5Aa | 12.3Ba | 19.2Ab | 16.4Aa | 19.2Aa | 13.3Aa | 10.1Ba |
| | 15000 | 7.7Aa | 7.0Aa | 9.8Ab | 12.7Ac | 16.5Ba | 17.1Ba | 10.6Aa | 8.0Ba |
| Altura (m) | 5000 | 0.8Aa | 0.5Ba | 1.2Ca | 1.8Aa | 2.3Aa | 1.4Aa | 0.9Aa | 0.7Aa |
| | 10000 | 0.9Aa | 0.5Ba | 1.2Ca | 1.5Aa | 1.4Ba | 1.4Aa | 1.0Aa | 0.6Ba |
| | 15000 | 0.7Aa | 0.5Aa | 0.9Bb | 0.9Ab | 1.4Ba | 1.4Ba | 0.8Aa | 0.4Bb |

Donde, *Ad* es *Acacia dealbata*, *En* es *Eucalyptus nitens*, *Ed* es *Eucalyptus denticulata*, *Eg* es *Eucalyptus globulus*, diferentes letras mayúsculas muestran diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) entre especies; diferentes letras minúsculas muestran diferencias significativas ($\alpha = 0,05$) entre densidad de plantación. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte la supervivencia del rebrote en cepas de dos años, se observa que en el sitio Parcelas Collipulli, en la especie *Eucalyptus globulus* presentó la mayor tasa con un 93%, lo que le permitió superar de forma significativa a *Eucalyptus nitens* y *Acacia dealbata* con 21 y 73%, respectivamente. En el predio la Aguada, la especie *Eucalyptus denticulata* en la densidad de 5000 árboles ha⁻¹ reportó la menor tasa de supervivencia con un 34 %. En la misma densidad le siguió *Acacia dealbata* con 57 % y *Eucalyptus globulus* hasta 72% de supervivencia. En Pilpilco abajo, la densidad que reportó mayor mortalidad fue en 15000 árboles ha⁻¹ con una supervivencia para *Eucalyptus globulus* del 35% y un 29% para *Eucalyptus nitens* (Figura 3, Tabla 1).

Eucalyptus globulus mostró la mayor capacidad de supervivencia del rebrote en dos de los tres sitios de estudio, aunque únicamente se detectó significancia estadística ($\alpha = 0,05$) en Parcelas Collipulli (Figura 3, Tabla 1). En un estudio de la misma especie se obtuvieron resultados similares de supervivencia, en los que se corroboró la capacidad de rebrote de esta especie debido a su alto potencial de iniciación en las yemas epicórmicas y la presencia de lignotuber con un porcentaje de supervivencia del 89% (Catry *et al.* 2013).

Para el número de rebrotes adventicios, la especie *Eucalyptus globulus* mostró valores similares en Parcelas Collipulli (8) y La Aguada (9) (Tabla 1). En esta última localidad sobresalió también *Eucalyptus denticulata*, especie que registró seis rebrotes adventicios. De la misma forma, la especie *Eucalyptus globulus* registró un número significativamente mayor de rebrotes proventicios, con respecto al resto de las especies evaluadas (Figura 4), en Parcelas Collipulli (7) y Pilpilco Abajo (6). Se corroboró que todas las especies mostraron características de brotación aceptables para su uso en el sistema de monte bajo, en el cual se requiere de uno a tres retoños de tipo proventicios para estimular el crecimiento en altura de los rebrotes (Geldres *et al.* 2004). Se debe considerar que un número mayor de rebrotes proventicios y adventicios

requiere un manejo silvícola apropiado para evitar estrés de los rebrotes en crecimiento. Se recomienda dar prioridad a los rebrotes proventicios, eliminando los retoños adventicios y rebrotes proventicios con doble flecha, bifurcación y curvatura en el fuste (Geldres *et al.* 2004).

La densidad de plantación no mostro efecto significativo sobre el número de rebrotes en ninguna de las especies bajo estudio pero si en la interacción especie-densidad (Tabla 1). La respuesta observada está en función de la planta madre –cepa- ya que el crecimiento inicial del rebrote parte de las reservas de nutrientes de la cepa. Las especies estudiadas pueden ser manejadas a partir de rebrotes para la producción de biomasa. Lo anterior, mediante el uso de los rebrotes proventicios, los cuales muestran un crecimiento vigoroso y superan entre 10% y 20% el diámetro del cuello y la altura observada en los rebrotes adventicios (Brassiolo *et al.* 2007).



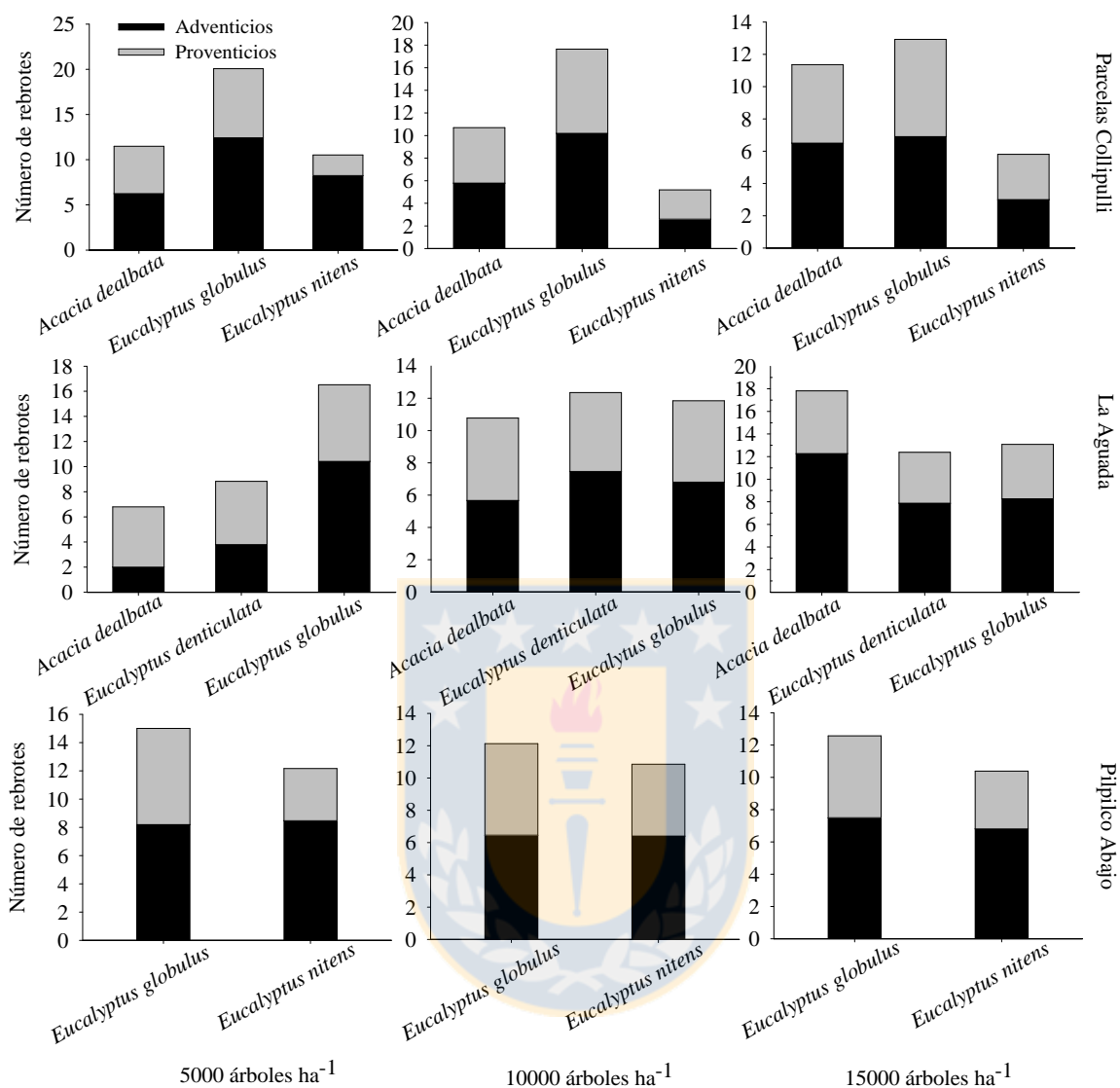


Figura 4. Número de rebrotes adventicios y proventicios, según especie y densidad de plantación. Fuente: Elaboración propia.

El sitio Parcela Collipulli, registró diferencias significativas en las variables de estado evaluadas en el factor especie y la interacción especie-densidad de plantación, para el diámetro a la altura del cuello (Dac), la especie *Eucalyptus globulus* mostró el valor más alto con 12,3 mm, superando significativamente a las especies *Acacia dealbata* (8,9 mm) y *Eucalyptus nitens* (13,0 mm). En el resto de los sitios incluidos en el estudio se observó igualdad estadística para el Dac con valores entre 12,7 mm y 20,0 mm en La Aguada y de 8,0 mm a 13,3 mm en Pilpilco Abajo (Tabla 1).

En el sitio La Aguada se obtuvieron los valores más altos de Dac y disminución paulatina de esta variable conforme se incrementó la densidad de plantación (Tabla 1). Los valores se redujeron de 20,0 mm en 5000 árboles ha⁻¹ hasta alcanzar un nivel significativamente inferior en la densidad de 15000 árboles ha⁻¹ (12,7 mm). En el resto de los sitios se observaron valores bajos (7,7 mm) en la densidad mayor (15000 árboles ha⁻¹) y 8,9 mm en 10000 árboles ha⁻¹. Resultados similares reportó Ferrere *et al.* (2005) (Ferrere *et al.* 2005) en *Eucalyptus globulus* donde observó efecto significativo de la densidad de plantación sobre el diámetro normal (DAP) y se estableció que la disminución de la cantidad de plantas ha⁻¹ incrementó la tasa de crecimiento del diámetro.

En la variable altura, la especie *Eucalyptus globulus* presentó los valores más altos en todos los sitios, los cuales resultaron estadísticamente superiores al resto de las especies en Parcelas Collipulli (1.2 m) y Pilpilco (0.8 m). El valor que registró esta especie en La Aguada fue mayor (2,3 m), seguido por *Acacia dealbata* (1.8 m) y *Eucalyptus denticulata* (1.4 m). En otros estudios se observó reducción considerable del número de rebrotes conforme se incrementó la altura, aunque se omitió la diferenciación de los tipos de rebrotes (Solimani 2011). En todos los sitios de evaluación se observó efecto negativo al incrementar la densidad de plantación sobre la altura del rebrote (Tabla 1). En Parcelas Collipulli y Pilpilco Abajo, la mayor altura de los rebrotes se obtuvo en las densidades de 5000 y 10000 árboles ha⁻¹ (0.9 m y 0.8 m); mientras que, en la densidad de 15000 árboles ha⁻¹ se registró una reducción significativa para esta variable en un rango de 0.5 a 0.7 m. Resultados similares reportó Ferrere *et al.* (2005) con *Eucalyptus globulus* donde identificó que al disminuir la densidad de plantación aumentó el crecimiento en diámetro y, en menor medida, en altura.

Conclusiones

El éxito de cultivos forestales bajo un sistema de monte bajo está relacionado con la elección de especies de fácil brotación y el mantener la supervivencia en las primeras etapas de crecimiento de la plantación inicial, para obtener el mayor número de cepas vivas que darán origen a nuevos

individuos. La especie *Eucalyptus globulus* mostró altas tasas de supervivencia en todos los sitios evaluados, por lo que puede ser considerada como una buena opción para optimizar el sistema productivo de biomasa por unidad de superficie a partir de rebrotes. Dicha especie mostró altas tasas de supervivencia al final del ciclo de corta (2 años), un gran nivel de brotación en la mayoría de los sitios y producción de numerosos rebrotes proventicios; así como, el mayor incremento del diámetro y altura de los rebrotes dominantes. También la especie *Acacia dealbata* puede ser utilizada en algunos sitios como especie de monte bajo, para la producción de biomasa dendroenergética, aunque es necesario asegurar la supervivencia en el primer ciclo de corta (cepas vivas). Además, es necesario ajustar el manejo forestal para incluir acciones encaminadas al control del consumo ejercido por la fauna silvestre (lagomorfos).



Referencias

- Alonso S, V Asensio, AB Casaleiro, M J. 2008. Control de eucalipto y reforestación con especies caducifolias: innovación y efectos ecológicos. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 28:37-42.
- Barros S. 2013. Introducción de especies de *Eucalyptus* a Chile. Reseña histórica. *Ciencia e Investigación Forestal* 19:69-94.
- Binkley D, JL Stape. Year. Sustainable management of *Eucalyptus* plantations in a changing world. In Borralho et al.(2004) *Eucalyptus in a Changing World*. Proc. of IUFRO Conf., Aveiro. 11-15 p.
- Brassiolo M, C Gomez, M Abt. 2007. Regeneración de un rodal de Tipa blanca utilizando brotes de cepas [Método de Monte Bajo]. *Revista de Ciencia y Tecnología* 3:44-53.
- Catry F, F Moreira, R Tujeira, J Silva. 2013. Post-fire survival and regeneration of *Eucalyptus globulus* in forest plantations in Portugal. *Forest Ecology and Management* 310:194-203.
- Cornejo PA. 2008. Efecto de intensidades de corte en el rebrote de *Acacia caven* (Mol.) Mol. Tesis Memoria de Título Ingeniero Agrónomo. Santiago de Chile. Facultad de Ciencias Agronomicas, Universidad de Chile. 29 p.
- Domingues RMA, DJS Patinha, GDA Sousa, JJ Villaverde, CM Silva, CSR Freire, AJD Silvestre, C Pascoal Neto. 2011. *Eucalyptus* biomass residues from agro-forest and pulping industries as sources of high-value triterpenic compounds. *Cellulose Chemistry and Technology* 45:475-481.
- Ferreira T, JM Paiva, C Pinho. 2014. Performance assessment of invasive *Acacia dealbata* as a fuel for a domestic pellet boiler. *Chemical Engineering Transactions* 42:73-78.
- Ferrere P, GA Lopez, RT Boca, MA Galetti, CA Esparrach, PS Pathauer. 2005. Initial density effect on *Eucalyptus globulus* growth in a Nelder modified trial. *Forest Systems* 14:174-184.
- Fuentes R, A Pauchard, L Cavieres, R García. 2011. Survival and growth of *Acacia dealbata* vs. native trees across an invasion front in south-central Chile. *Forest Ecology and Management* 261:1003-1009.

- García O, F Ruiz. 2003. A growth model for eucalypt in Galicia, Spain. *Forest Ecology and Management* 173:49-62.
- Geldres E, JE Shlatter, A Marcoleta. 2004. Monte Bajo, opción para tres especies de Eucaliptos en segunda rotación, un caso en la provincia de Osorno, Décima Región, Chile. *Bosque* 25:57-62.
- Hamilton MG, GW Dutkowski, KR Joyce, BM Potts. 2011. Meta-analysis of racial variation in *Eucalyptus nitens* and *E. denticulata*. *New Zealand Journal of Forestry Science* 41:217-230.
- McKendry P. 2002. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Bioresource technology* 83:47-54.
- Mendes M, A Pala. 2003. Type I error rate and power of three normality tests. *Pakistan Journal of Information and Technology* 2:135-139.
- Pérez S, C Renedo, A Ortiz, M Mañana, D Silió. 2006. Energy evaluation of the *Eucalyptus globulus* and the *Eucalyptus nitens* in the north of Spain (Cantabria). *Thermochimica Acta* 451:57-64.
- Rodríguez A, J. Cancino, E. Acuña, R. Rubilar, F. Muñoz,. 2012. Crecimiento de plantaciones dendroenergéticas de *Eucalyptus* spp., según densidad de plantación y ciclo de rotación, en suelos contrastantes de la región del Bío Bío, Chile. In Congreso Latinoamericano: Eucaliptos Mejorados para Aumentar la Competitividad del Sector Forestal en América Latina, Pucón, Chile. 64 p.
- Ruiz F, G Lopez. Year. Review of cultivation history and uses of eucalypts in Spain. In Conference of *Eucalyptus* species management, history, status and trends in Ethiopia, 15 -18 september 2010.'Proceedings'. Addis Ababa, Ethiopia. 13-28 p.
- Sandoval S. 2011. Modelación del crecimiento y rendimiento en biomasa aérea de ensayos dendroenergéticos. Tesis Doctorado. Concepción, Chile. Departamento de Manejo de Bosques y Medio Ambiente, Universidad de Concepción. 183 p.
- Silva C, O Salgado, B Rivas. 2011. Evaluación de la capacidad de rebrotes de dos especies arbóreas en el bosque tropical seco en Nandarola, Pacífico Sur. *La Calera* 8:57-61.
- Sixto H, M Hernández, M Barrio, J Carrasco, I Cañellas. 2008. Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión. *Forest Systems* 16:277-294.

- Solimani N. 2011. Evaluation physiographic factors on oak sprout structure in mountain forest of west of Iran. *Advances in Environmental Biology* 5:2906-2912.
- Turnbull J. 1999. Eucalypt plantations. *New Forests* 17:37-52.



IV. Modelos alométricos para estimar biomasa aérea en rebrotes de cepas de dos años en tres cultivos dendroenergéticos

Resumen

Debido a la dificultad de medición de cada rebrote en cultivos poli-fustales, este estudio tuvo como objetivo ajustar modelos para la estimación de biomasa aérea a nivel de cepa en base a mediciones realizadas en un reducido número de brotes dominantes. Los datos utilizados provienen de un ensayo en bloques completamente aleatorios en cepas de dos años con las especies *Eucalyptus globulus*, *E. denticulata* y *Acacia dealbata*, establecidas en tres densidades de plantación (5000, 10000 y 15000 árboles ha⁻¹). En el análisis se probaron tres variables predictoras diferentes: el diámetro al cuadrado por la altura del rebrote dominante principal, el promedio de los diámetros al cuadrado por la altura promedio de los dos principales rebrotes dominantes y, el producto del promedio de los diámetros al cuadrado por la altura promedio de los dos principales rebrotes dominantes multiplicando por el número de rebrotes proventicios. De los ajustes de modelos para la estimación de la biomasa aérea en rebrotes, resultaron dos grupos, el modelo alométrico general y modelos alométricos por género. En el modelo alométrico general, la biomasa total y por componente fue explicada por el producto del diámetro del cuello al cuadrado medio, por la altura media de los dos rebrotes proventicios dominantes por el total de los rebrotes proventicios ($\overline{dac}^2 \mid \bar{H} \mid vp$) como variable predictora. Para las tres especies, todos los parámetros incluidos en el modelo alométrico general, que corresponde al primer grupo, resultaron significativos al 95%. En el segundo grupo, los modelos empíricos por género mostraron mejores ajustes de hasta un 99% de significancia. Para la determinación del efecto de la edad (10, 21 y 31 meses) sobre los parámetros de regresión, se incluyeron variables dummy, encontrando diferencias significativas en la mayoría de los parámetros. Se logró ajustar modelos para la estimación de biomasa total y por componente con tan solo la medición de los dos rebrotes o rebrotes dominantes de la cepa, así, evitando medir cada rebrote como tallo individual o realizar prácticas de poda en las cepas.

Palabras clave. Alometría, rebrotes, biomasa, corta rotación.

Introducción

El crecimiento de la economía mundial presenta importantes desafíos frente la demanda futura de energía. Los cultivos forestales de corta rotación (SRWC) con fines energéticos son una alternativa viable para aumentar y diversificar el suministro energético del país (Peña 2010). En Chile existen aproximadamente 1,8 millones de hectáreas de suelos considerados de secano, los que si bien tienen restricciones para el crecimiento (i.e. pluviometría concentrada en 3 a 4 meses de invierno y un período de sequía de 7 a 9 meses), pueden ser utilizados para establecer cultivos energéticos empleando especies forestales especialmente adaptadas a esta condición (Santelices *et al.* 2013).

El establecimiento de cultivos de corta rotación para la producción de biomasa podría proporcionar beneficios ambientales y económicos significativos para las comunidades rurales, y para la sociedad en conjunto (REN21 2013). La biomasa forestal es una fuente de energía renovable que puede ser manejada sustentablemente (Richardson y Verwijst 2007), la sustentabilidad de los cultivos dendroenergéticos depende de varios factores, entre ellos de las operaciones y la economía de la producción de la materia prima, la productividad del sitio y las mejoras en las prácticas silvícolas (Richardson y Verwijst 2007).

Muchas especies son adecuadas para la producción de grandes volúmenes de biomasa si se gestionan como cultivos forestales de corta rotación. Entre los géneros más importantes a nivel mundial se encuentran eucaliptos (*E. globulus*, *E. nitens*, *E. denticulata*) (Camps y Marcos 2002), sauce (*Salix* spp), álamo (*Populus* spp.), paulownia (*Paulownia* spp) y *Acacia* (*Acacia dealbata*, *A. melanoxylon* y *A. retinodes*). Estas especies son de alto interés para cultivos dendroenergéticos debido a su rápido crecimiento y fácil brotación (Hoogwijk *et al.* 2005); la última característica es de alta relevancia, debido a que varios ciclos de corta sucesivos pueden estar basados en un único establecimiento inicial, evitando los costos de replantación (Sixto *et al.* 2008). Las especies de corta rotación son cultivadas a altas densidades de plantación bajo un sistema de monte bajo o de rebrotes, técnica para producir biomasa después del primer ciclo de corta; logrando un mayor rendimiento por unidad de superficie en comparación a plantaciones uni-fustales (Souza *et al.* 2015), con ciclos de corta entre 1 a 15 años (Ríos *et al.* 2016).

La cuantificación del rendimiento de cultivos dendroenergéticos requiere de funciones para estimar la biomasa aérea, ya sea total o por componente. En plantaciones tradicionales, establecidas con fines madereros o pulpables, es habitual el uso de funciones con variables predictoras fácilmente mensurables en el árbol (e. g. diámetro a la altura del pecho y altura total), cuya correlación con la biomasa total y por componente es alta; en general, ésta es una de las mejores opciones para predecir y cuantificar la biomasa en plantaciones uni-fustales (Hauk *et al.* 2014). Sin embargo, en un sistema de monte bajo, como ocurre en cultivos dendroenergéticos a partir del segundo ciclo de cultivo, surgen numerosos rebrotes de cada cepa formando individuos poli-fustales; esto presenta desafíos interesantes en la estimación de la biomasa aérea total, o por componentes cuando se requiera. De aquí surge el interés de la presente investigación por ajustar modelos para estimar la biomasa aérea de rebrotes a nivel de cepas de tres especies dendroenergéticas, en cepas de dos años de edad.

Metodología

El estudio se realizó en el predio La Aguada, perteneciente a la comuna de Yumbel. Antecedentes generales del sitio y del diseño del ensayo se detallan en el capítulo II.

Medición de variables. En este estudio está basado en el cuadrante cosechado en diciembre de 2012, correspondiente a la frecuencia de corte bianual. Para ello, se realizaron mediciones en octubre de 2013, septiembre 2014 y septiembre 2015. En cada ocasión, en el núcleo de cada unidad experimental, se registró el número de rebrotes proventicios y adventicios de cada cepa, definiendo el tipo de rebrote según sus características físicas y posición; aquellos que brotaron en la corona de la cepa y en posición horizontal fueron identificados como adventicios y aquellos mejor unidos a la planta madre (cepa) y en posición vertical como rebrotes proventicios. A los dos principales rebrotes proventicios dominantes de cada cepa y se les midió la altura total, el diámetro de la copa, el diámetro del cuello a nivel del suelo (D; 0.1 m sobre el suelo) y el diámetro normal (DAP), desde que los rebrotes superaron la altura de 1.3 m.

Los datos utilizados en la elaboración de las funciones de biomasa se recopilaron en las mismas fechas de medición y resultaron de un estudio destructivo de biomasa, de tres cepas

seleccionadas de la zona de la mitigación del efecto de borde de cada unidad experimental. Las cepas recolectadas cubrieron tanto la distribución diametral (D) y de altura total. Estas cepas fueron cortadas a 0.1 m sobre el nivel del suelo y luego transportadas y almacenadas a 4 °C. En laboratorio, de cada cepa se separaron y contabilizaron los rebrotes según su tipo y se les midió la altura total y el diámetro de sección a lo largo del fuste (0.10, 0.50, 1.0 y 1.30 m). Posteriormente, los componentes (tallo, rama y hojas) de cada rebrote fueron pesados en verde en una báscula digital de 0.01 g de precisión. Para la determinación del peso seco se tomaron muestras de cada componente de hasta 500 g, las que se secaron en estufa a 105 °C hasta peso constante (Brown, 1997b; Schlegel *et al.*, 2000), posteriormente, de la razón entre el peso seco y el peso húmedo de la muestra, se calculó la biomasa seca total de cada componente en cada cepa. La biomasa total por cepa se obtuvo al sumar la biomasa de todos los componentes.

$$P_s = P_h \times \frac{CH_{bs}}{100} Z1$$

Donde, P_s es la biomasa seca, P_h es el peso húmedo, CH_{bs} es el contenido de humedad base seca de la muestra.

Identificación de variables predictoras. En la modelación de la biomasa en cultivos poli-fustales se han utilizado modelos lineales simples, usando la sumatoria del diámetro del cuello al cuadrado por la altura total de cada uno de los rebrotes en la cepa como variable predictora. Sin embargo, debido a la dificultad de medición de cada rebrote o rebrote, lo que trae como resultados tiempos de medición mayores y altos costos de operación, -en la realización de un inventario en este tipo de cultivos-, en este estudio se buscó identificar una variable predictora más simple. Para ello, utilizando el modelo alométrico general (Modelo 1) que es habitual en los estudios de estimación de biomasa, se probaron tres diferentes conjuntos de variables (x_i): i) el producto del diámetro al cuadrado por la altura del rebrote dominante ($dac^2 | H$); ii) el producto del promedio de los diámetros al cuadrado por la altura promedio de los dos principales rebrotes dominantes ($\overline{dac}^2 | \overline{H}$); y iii) el producto del promedio de los diámetros al cuadrado por la altura promedio de los dos rebrotes dominantes, multiplicando por el número de rebrotes

proventicios $(\overline{dac}^2 | \overline{H} | nvp)$. También se analizaron dos modelos alométricos adicionales (Modelos 2 y 3), consistentes en variantes de esta última variable predictora. En estos dos últimos modelos se analizaron efectos de especie y edad mediante la incorporación de variables dummy (Modelos 4 y 5).

$$y_i = X a_0 x_i^{b_1} \quad (1)$$

$$y_i = X a_0 (\overline{dac}^2 | \overline{H})^{b_1} (vp)^{b_2} \quad (2)$$

$$y_i = X a_0 (\overline{dac}^2)^{b_1} f \overline{H} \Delta vp^{b_2} \quad (3)$$

$$y_i = X (a_0 \Gamma u_{0_2} \Gamma u_{0_3}) (\overline{dac}^2 | \overline{H})^{b_1 \Gamma u_{1_2} \Gamma u_{1_3}} (vp)^{b_2 \Gamma u_{2_2} \Gamma u_{2_3}} \quad (4)$$

$$y_i = X (a_0 \Gamma u_{0_2} \Gamma u_{0_3}) (\overline{dac}^2)^{b_1 \Gamma u_{1_2} \Gamma u_{1_3}} f \overline{H} \Delta vp^{b_2 \Gamma u_{2_2} \Gamma u_{2_3}} \quad (5)$$

Donde, y_i es la biomasa aérea total de la i -ésima cepa, x_i es la variable predictora en la i -ésima cepa, \overline{dac}^2 es el diámetro del cuello al cuadrado medio de los dos rebrotes proventicios dominantes en la cepa, \overline{H} es la altura media de los dos rebrotes dominantes en la cepa, vp es el número de rebrotes proventicios, a_0, b_1, b_2 son parámetros de regresión y u_{i_2} variable dummy asociada a la edad de 21 meses y u_{i_3} variable dummy asociada a la edad de 31 meses.

La bondad de ajuste de los modelos se evaluó utilizando la raíz del cuadrado medio residual (RMSE).

$$RMSE = \sqrt{\frac{sce}{n - p}}$$

Donde, sce es la suma de cuadrados residuales (i.e. $\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$), n es el número total de observaciones y p es el número de parámetros.

Para la selección de los mejores modelos se utilizó el criterio de información de Akaike (AIC), el cual es útil en la comparación de modelos que varían en el número de parámetros, seleccionando el mejor modelo con el índice más bajo. Todos los ajustes de los modelos fueron realizados mediante el procedimiento PROC NLIN, con el software estadístico SAS 9.2 (SAS Institute Inc. 2008) y para el análisis del número de rebrotes a lo largo del tiempo se realizó mediante estadística descriptiva.

$$AIC = -2 \ln \left(\frac{sce}{n} \right) + 2p$$

Donde, n es el tamaño de muestra, sce es la suma de cuadrados residuales y p es el número de parámetros en el modelo.

Resultados

El conteo de rebrotes a los 10, 21 y 31 meses de crecimiento permitió analizar el número de los rebrotes adventicios y proventicios en la cepa por cada especie y densidad de plantación (Figura 5). A los diez meses de crecimiento, *A. dealbata* a los 10 meses de crecimiento en 15000 árboles ha^{-1} , registró el mayor número de rebrotes adventicios con una media de ocho y valores extremos inferior y superior de 2 y 37, respectivamente. Con el tiempo se registró una reducción significativa de este tipo de rebrotes, i.e. seis rebrotes a los 21 meses y tres a los 31 meses. El número de rebrotes proventicios se mantuvo constante en el tiempo, con una media de cuatro y valores extremos inferior y superior de 1 y 6, respectivamente. *E. denticulata* a los 10 meses de crecimiento mostró en promedio entre cinco y siete rebrotes en las densidades de 10000 y 15000 árboles ha^{-1} , respectivamente, observándose una fuerte variación entre cepas con valores máximos de hasta 25 rebrotes. Esta cantidad se redujo considerablemente a los 31 meses, hasta un 25% en rebrotes adventicios y 40% en proventicios en todas las densidades de plantación (Figura 5). En *E. globulus* a 5000 árboles ha^{-1} , a los 10 meses se observó un mayor número de rebrotes adventicios, con un promedio de ocho y un máximo de 36; a los 21 y 31 meses se registró una disminución, con un promedio de tres para ambos tipos de rebrotes (Figura 5).

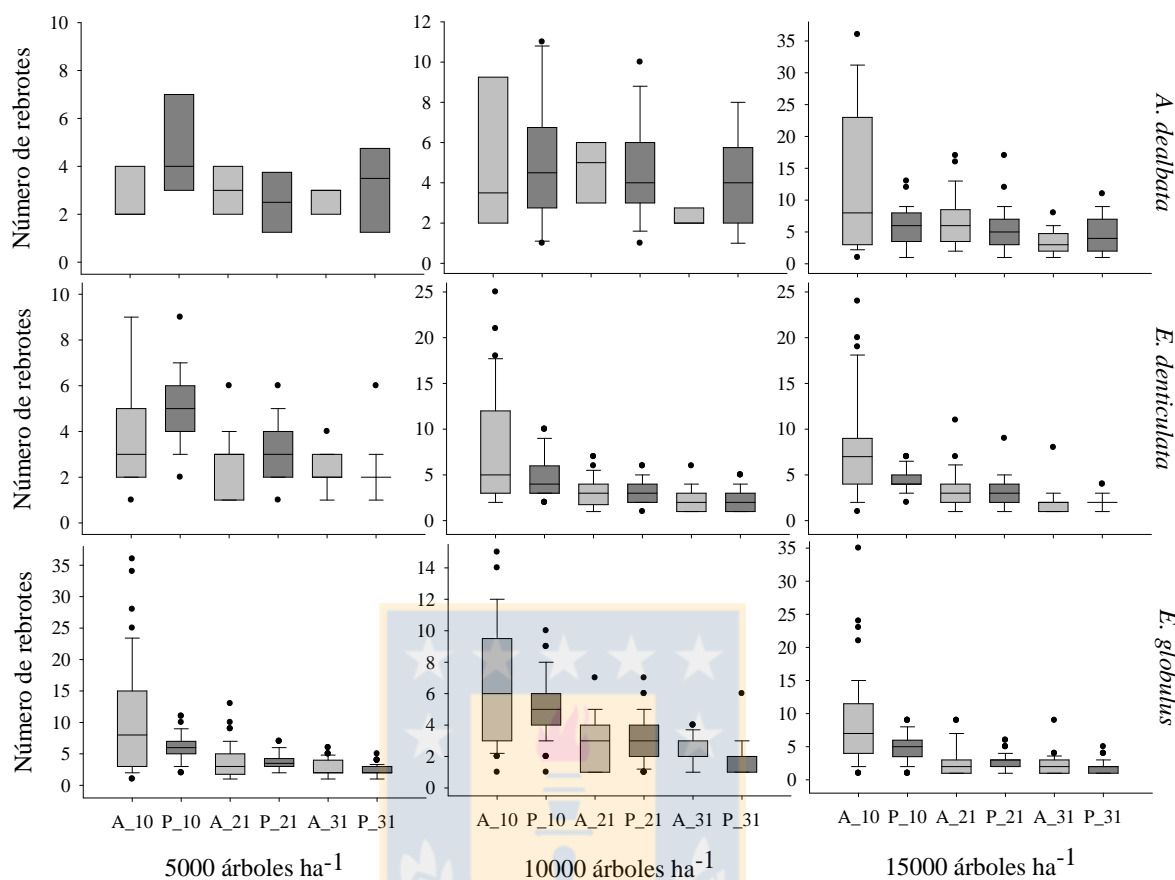


Figura 5. Diagrama de caja del número de rebrotes adventicios (A) y proventicios (P) en tres edades (10, 21 y 31 meses) en cepas de tres especies vegetales y densidades de plantación. La línea continua muestra el valor medio, los extremos de las columnas los límites de los datos, la línea de desviación es el tercer cuartil, la línea de abajo representa el primer cuartil y los puntos muestran los valores atípicos. Fuente: Elaboración propia.

En las tres especies, la biomasa total y por componente fue mejor explicada por el producto entre el promedio del diámetro de cuello al cuadrado, la altura media de los dos rebrotes proventicios dominantes y la cantidad de rebrotes proventicios ($\overline{dac}^2 | \bar{H} | vp$). En las tres especies, todos los parámetros incluidos en el modelo alométrico general (Modelo 1) resultaron significativos al 95% en la estimación de biomasa total y por componente (Tabla 3). El estadístico de bondad de ajuste RMSE osciló entre 913-168 g. *E. globulus* fue la especie que mostró mayor RMSE en la estimación de biomasa total y dos de los componentes (tallo y hojas).

Los estadísticos del componente ramas en *A. dealbata* y *E. denticulata* mostraron mayor variación, seguido por el componente hojas para las tres especies estudiadas (Tabla 3).

Tabla 2. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste en el modelo alométrico general (Modelo 1) para la estimación de biomasa aérea total y de componentes (tallo, rama y hojas) en rebrotes, de las tres especies estudiadas.

| Especie | Biomasa | N | a_0 | b_1 | RMSE | AIC |
|-----------------------|---------|----|---------|----------|--------|--------|
| <i>A. dealbata</i> | total | 63 | 2.3316* | 0.7188** | 690.32 | 825.7 |
| | tallo | 63 | 0.8258* | 0.7712** | 485.79 | 781.4 |
| | ramas | 63 | 1.2153* | 0.6132** | 185.68 | 660.2 |
| | hojas | 63 | 0.5221* | 0.7166** | 224.64 | 684.2 |
| <i>E. denticulata</i> | total | 76 | 5.5198* | 0.6892** | 880.85 | 1032.7 |
| | tallo | 76 | 1.8896* | 0.7336** | 626.39 | 980.8 |
| | ramas | 76 | 1.6124* | 0.6377** | 202.67 | 809.3 |
| <i>E. globuluss</i> | hojas | 76 | 2.9643* | 0.6284** | 290.95 | 864.3 |
| | total | 81 | 2.0506* | 0.7852** | 913.76 | 1106.4 |
| | tallo | 81 | 0.6299* | 0.8523** | 758.01 | 1078.1 |
| | ramas | 81 | 0.4804* | 0.7389** | 168.98 | 833.0 |
| | hojas | 81 | 2.6837* | 0.6209** | 313.81 | 933.3 |

Donde, n es el tamaño de muestra, a_0 , b_1 , son los parámetros de regresión, RMSE es la raíz del cuadrado medio del error, AIC es el criterio de información de Akaike y, los asteriscos señalan niveles de significancia, i.e. * = 0.05; ** = 0.01. Fuente: Elaboración propia.

La tendencia de los valores de biomasa aérea total y por componente, con respecto a la variable predictora, fue similar en las tres especies. La mayor variación se observó en *E. denticulata* y *E. globulus*, principalmente en los componentes ramas y hojas. Esta variación pudiera estar asociada al análisis conjunto de biomasa en las tres fechas de evaluación (10,21 y 31 meses) ya que los rebrotes, al competir por espacio y nutrientes intra y entre cepas, hace que en el transcurso del tiempo estos componentes sean más variables en su biomasa. (Tabla 3 y Figura 6).

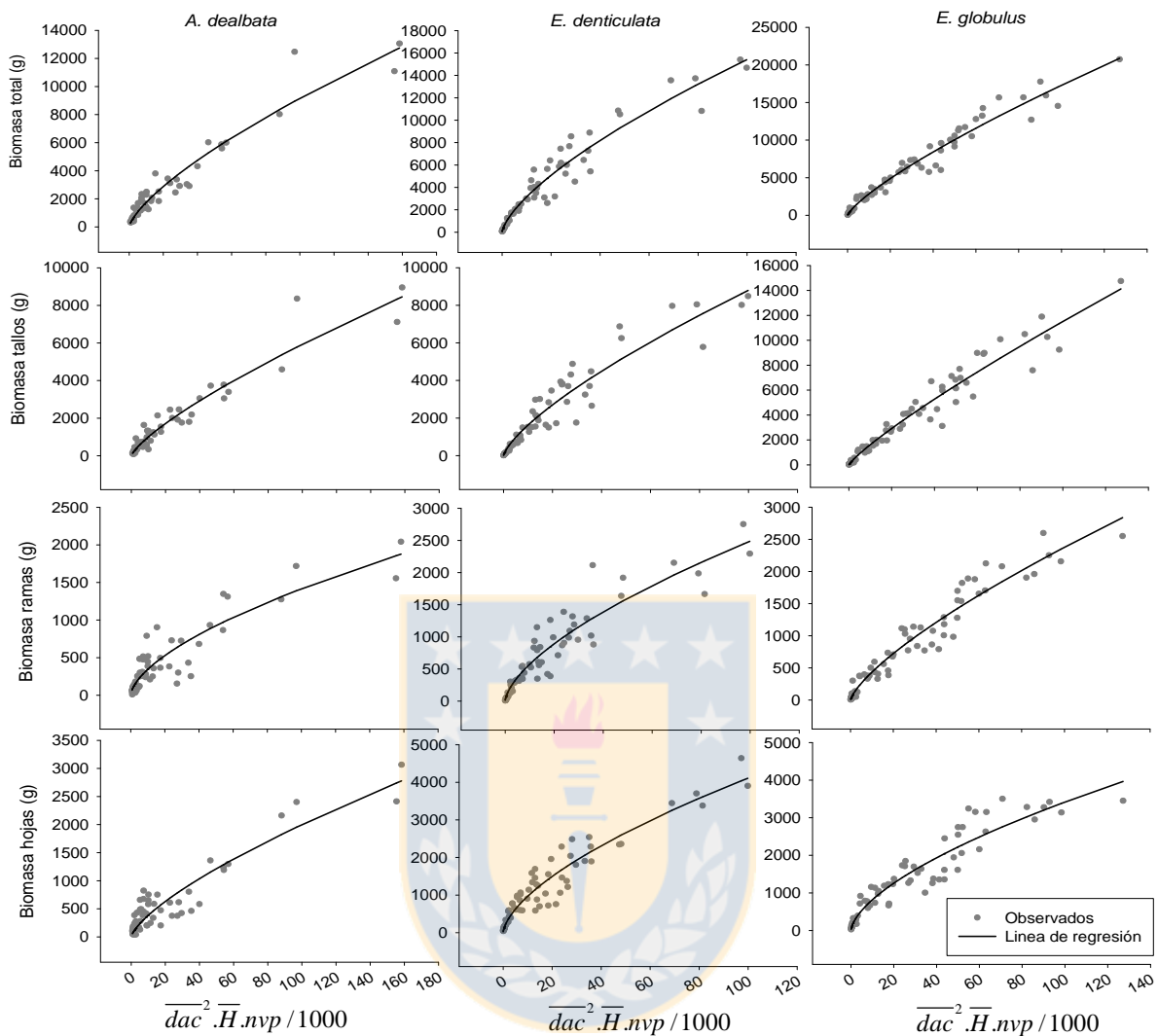


Figura 6. Dispersión de los datos observados de biomasa aérea total y de componentes (tallo, ramas y hojas) en rebrotes y línea de tendencia en función del modelo de regresión ajustado. Fuente: Elaboración propia.

Los modelos alométricos empíricos 2 y 3 proporcionaron mejores ajustes que el modelo alométrico general (Modelo 1). El modelo 2 utilizado en *A. dealbata* cuenta con tres parámetros de regresión, donde los estadísticos de bondad de ajuste fueron similares al modelo alométrico general, pero al hacer la comparación de modelos con el índice de Akaike, resulta menor en estos modelos, con valores que van de 812,8 a 656 (Tabla 4).

Tabla 3. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste en el modelo alométrico empírico (Modelo 2) para la estimación de biomasa aérea total y de componentes en rebrotes de *A. dealbata*.

| Biomasa (y) | n | a_0 | b_1 | b_2 | RMSE | AIC |
|-------------|----|---------|----------|----------|--------|-------|
| total | 63 | 1.3238* | 0.8050** | 0.6025** | 618.88 | 812.8 |
| tallo | 63 | 0.5095* | 0.8436** | 0.6779** | 461.53 | 775.8 |
| ramas | 63 | 0.8326* | 0.6835** | 0.4741** | 179.45 | 656.8 |
| hojas | 63 | 0.4260* | 0.7465** | 0.6805** | 219.69 | 678.1 |

Donde, n es el tamaño de muestra, a_0, b_1, b_2 son los parámetros de regresión, RMSE es la raíz del cuadrado medio del error, AIC es el criterio de información de Akaike y, los asteriscos señalan niveles de significancia, i.e. * = 0.05; ** = 0.01. Fuente: Elaboración propia.

El modelo 3, ajustado para estimar biomasa aérea total y por componentes en las especies de *Eucalyptus*, arrojó mejores ajustes en sus estadísticos que el modelo alométrico general, donde dos de sus parámetros resultaron con alta significancia ($\alpha = 0.01$) reduciendo su RMSE en biomasa total y sus componentes (tallo, ramas y hojas) todos comparados con AIC. Este modelo tiene diferente estructura al ajustado en *A dealbata*, esto por tratarse de dos géneros disimiles (*Eucalyptus* y *Acacia*) hace que el desarrollo de rebrotes y acumulación de biomasa a lo largo del tiempo sean diferentes en cada género, obligando a desarrollar modelos particulares por género o a veces a nivel de especie (Tabla 5).

Tabla 4. Parámetros estimados y estadísticos de bondad de ajuste en el modelo alométrico empírico (Modelo 3) para la estimación de biomasa aérea total y de componentes en rebrotes de *E. denticulata* y *E. globulus*.

| Biomasa (y) | n | a_0 | b_1 | b_2 | RMSE | AIC |
|-------------|----|---------|----------|----------|--------|--------|
| Ed –total | 76 | 5.1300* | 0.6549** | 0.5397** | 678.93 | 994.1 |
| Ed –tallo | 76 | 1.4636* | 0.7448** | 0.4872** | 376.57 | 904.4 |
| Ed –ramas | 76 | 1.4167* | 0.5987** | 0.4937** | 188.62 | 799.4 |
| Ed- hojas | 76 | 3.6021* | 0.5200** | 0.6759** | 317.86 | 878.7 |
| Eg –total | 81 | 2.0530* | 0.7397** | 0.7485** | 807.21 | 1087.3 |
| Eg –tallo | 81 | 0.7685* | 0.8101** | 0.7034** | 558.38 | 1027.6 |
| Eg- ramas | 81 | 0.4410* | 0.6750** | 0.8721** | 176.29 | 840.8 |
| Eg- hojas | 81 | 1.9853* | 0.5511** | 0.8024** | 354.32 | 953.9 |

Donde, Ed es *Eucalyptus denticulata*, Eg es *E. globulus*, n es el tamaño de muestra, a_0 , b_1 , b_2 , son los parámetros de regresión, RMSE es la raíz del cuadrado medio del error, AIC es el criterio de información de Akaike y, los asteriscos señalan niveles de significancia, i.e. * = 0.05; ** = 0.01. Fuente: Elaboración propia.

El análisis conjunto de la estimación de biomasa en rebrotes de las tres fechas de evaluación 10, 21 y 31 meses de edad, fue explicado incluyendo variables dummy para identificar las diferencias en cada parámetro de los modelos (4 y 5). En *A. dealbata* el modelo para estimar biomasa total y del componente hojas mostró diferencias significativas (<0,05) en todos los parámetros (Tabla 6), el α_{Γ} fue diferente con la edad de 31 meses (u_{0_3}) y los dos parámetros restantes mostraron diferencia en la edad de 21 meses (u_{1_2}, u_{2_2}) (Modelo 6), así arrojando seis parámetros de regresión dentro del modelo todos significativos disminuyendo el RMSE (Tabla 6), esto se puede explicar que en este tipo de cultivos y en esta especie el componente hojas es el que más variación tiene a lo largo del tiempo.

$$y_{total,hojas} = X a_0 \Gamma u_{0_3} (\overline{dac}^2 | \bar{H})^{b_1 \Gamma u_{1_2}} f_{vp}^{b_2 \Gamma u_{2_2}} A \quad (6)$$

$$y_{tallo} = X a_0 (\overline{dac}^2 | \bar{H})^{b_1 \Gamma u_{1_2}} f_{vp}^{b_2 \Gamma u_{2_2}} A \quad (7)$$

$$y_{rama} = X a_0 (\overline{dac}^2 | \bar{H})^{b_1} f_{vp}^{b_2 \Gamma u_{2_2}} A \quad (8)$$

Tabla 5. Parámetros estimados en los modelos alométricos empíricos (Modelos 6, 7 y 8) con el uso de variables dummy para estimar biomasa aérea total y de componentes en rebrotes de *A. dealbata*.

| Modelo | Biomasa (y) | N | a_0 | u_{0_3} | b_1 | u_{1_2} | b_2 | u_{2_2} | RMSE |
|--------|-------------|----|---------|------------|----------|------------|----------|------------|--------|
| 6 | Total | 63 | 1.2401* | -0.4575* | 0.8893** | -0.0971* | 0.4179** | 0.2927** | 486.77 |
| 7 | Tallo | 63 | 0.5019* | - | 0.8833** | 0.0799* | 0.4504** | 0.4064** | 372.90 |
| 8 | Ramas | 63 | 0.5519* | - | 0.7503** | - | 0.2983** | 0.1676* | 161.20 |
| 6 | Hojas | 63 | 0.2911* | 0.2039** | 0.9492* | 0.1573** | 0.4463** | 0.2646* | 178.61 |

Donde, y es la biomasa, \overline{dac}^2 es el diámetro del cuello al cuadrado medio de los dos rebrotes proventicios dominantes en la cepa, \bar{H} es la altura media de los dos rebrotes dominantes en la cepa, vp es el número de rebrotes proventicios, i son las variables dummy y a_0, b_1, b_2 son los parámetros de regresión, RMSE es la raíz del cuadrado medio del error y, los niveles de significancia son * = 0.05; ** = 0.01. Fuente: Elaboración propia.

El componente tallo mostro diferencias solo en la pendiente en la edad de 21 meses (u_{1_2}, u_{2_2}) (u_{1_2}, u_{2_2}) quedando con cinco parámetros de regresión (Modelo 7) y el componente ramas sólo en el parámetro b_2 a la edad de 21 meses (Modelo 8, Tabla 6).

En *E. denticulata* la biomasa total y los componentes tallo y ramas mostraron diferencias significativas en uno de los parámetros, correspondiente a la edad de 21 meses (u_{2_2}) (Modelo 9), este modelo resulto con cuatro parámetros mejorando el ajuste de estimación (Tabla 7). El componente hojas arrojó cinco parámetros de regresión, mostrando diferencias significativas en dos de sus parámetros u_{1_2}, u_{2_2} a la edad de 21 meses (Modelo 10).

$$y_{total, tallo, ramas} = X a_0 (\overline{dac}^2)^{b_1} f \bar{H} A^{vp} b_2 \Gamma u_{2_2} \Delta \quad (9)$$

$$y_{hojas} = X a_0 (\overline{dac}^2)^{b_1} \Gamma u_{1_2} f \bar{H} A^{vp} b_2 \Gamma u_{2_2} \Delta \quad (10)$$

Tabla 6. Parámetros estimados en los modelos alométricos empíricos (Modelo 9 y 10) con el uso de variables dummy para estimar biomasa total y de componentes en rebrotes de *E. denticulata*.

| Modelo | Biomasa (y) | n | a_0 | b_1 | u_{1_2} | b_2 | u_{2_2} | RMSE |
|--------|-------------|----|---------|----------|------------|----------|------------|--------|
| 9 | total | 76 | 7.4682* | 0.6033** | - | 0.6022** | -0.1058* | 637.16 |
| 9 | Tallo | 76 | 2.3237* | 0.6832** | - | 0.5468** | -0.1245* | 346.94 |
| 9 | Ramas | 76 | 1.9240* | 0.5561** | - | 0.5524** | -0.0969* | 185.98 |
| 10 | Hojas | 76 | 3.8205* | 0.4994** | 0.1405* | 0.7960** | -0.6871* | 293.24 |

Donde, y es la biomasa, \overline{dac}^2 es el diámetro del cuello al cuadrado medio de los dos rebrotes proventicios dominantes en la cepa, \bar{H} es la altura media de los dos rebrotes dominantes en la cepa, vp es el número de rebrotes proventicios, i son las variables dummy, a_0, b_1, b_2 son los parámetros de regresión, RMSE es la raíz del cuadrado medio del error y, los niveles de significancia son $*$ = 0.05; $**$ = 0.01. Fuente: Elaboración propia.

En *E. globulus* también mejoró su ajuste en sus parámetros con la incorporación de este tipo de variables, resultando solo un modelo tanto para la estimación de biomasa total y sus componentes tallo, ramas y hojas (Modelo 11) mostrando diferencias significativas en dos de sus parámetros en la edad de 31 meses (u_{1-3}, u_{2-3}) ((Tabla 8).

$$y = X a_0 (\overline{dac}^2)^{b_1 \Gamma_{1-3}} f \bar{H} A^{b_2 \Gamma_{2-3}} A \quad (11)$$

Tabla 7. Parámetros estimados en el modelo alométrico empírico (Modelo 11) con el uso de variables dummy para estimar biomasa total y de componentes en rebrotes de *E. globulus*.

| Biomasa | n | a_0 | b_1 | u_{1-3} | b_2 | u_{2-3} | RMSE |
|---------|----|----------|----------|-----------|----------|-----------|--------|
| total | 81 | 1.7305** | 0.8208** | -0.0687** | 0.4109** | 0.4539** | 707.20 |
| tallo | 81 | 0.7127* | 0.8677** | -0.0580* | 0.4011** | 0.4536** | 465.76 |
| ramas | 81 | 0.3271* | 0.8009** | -0.0986* | 0.4058* | 0.5695* | 162.88 |
| hojas | 81 | 1.4540* | 0.6632** | -0.0785* | 0.4296* | 0.4074* | 347.34 |

Donde, y es la biomasa, \overline{dac}^2 es el diámetro del cuello al cuadrado medio de los dos rebrotes proventicios dominantes en la cepa, \bar{H} es la altura media de los dos rebrotes dominantes en la cepa, vp es el número de rebrotes proventicios, i son las variables dummy, a_0, b_1, b_2 son los parámetros de regresión, RMSE es la raíz del cuadrado medio del error y, los niveles de significancia son $*$ = 0.05- $**$ = 0.01. Fuente: Elaboración propia.

Discusión

El número de rebrotes adventicios como proventicios fueron disminuyendo en el transcurso del tiempo por competencia y posición de las yemas en la cepa (Figura 2). Vita *et al.* (1997) evaluaron la respuesta del rebrote en *Acacia caven* a diferentes alturas de corte desde el nivel del suelo, registrando que los de origen adventicio fueron más abundantes en los tratamientos de cortes bajos, junto con aumentar a través del tiempo. Situación similar se encontró en éste estudio en el desarrollo inicial de rebrotes adventicios de *A. dealbata*, aunque disminuyendo al pasar el tiempo, al contrario de los proventicios que se mantuvieron. Esto último es atribuido a que la fisiología y producción de yemas es del tipo cespitoso, donde sus rebrotes tanto verticales como horizontales no entorpecen su desarrollo y sobrevivencia en comparación con los de eucaliptos donde tanto adventicios como proventicios van disminuyendo con el tiempo (Figura 2). Villegas (2003) encontró resultados similares en *E. globulus*, registrando que de los múltiples rebrotes por yema al pasar el tiempo solamente de 2 o 3 presentaron un rápido crecimiento, afectando así a los demás. Geldres *et al.* (2004), estudiaron tendencias de vigorosidad de 3 especies de eucaliptos, deducen que es factible manejar *E. globulus* a partir de rebrote, encontraron que *E. viminalis* expresa una buena capacidad de retoñación pero logra menores dimensiones y, *E. regnans* no fue una buena alternativa para un manejo tipo monte bajo. En nuestro estudio ambos eucaliptos (i.e. *E. denticulata* y *E. globulus*) mostraron patrones similares en producción de rebrotes y, se pudo distinguir a *E. globulus* como la de mayor vigor en los rebrotes (Figura 2).

El modelo alométrico general $y_i = X_i a_0 X_i^b$ ha sido utilizado en estudios de cultivos de corta rotación para la estimación de biomasa por Laureysens *et al.* (2004), Liberloo *et al.* (2005), Liberloo *et al.* (2006), Rock (2007), Röhle *et al.* (2006), Vande *et al.* (2007), Al Afas *et al.* (2008), Fajman *et al.* (2009), Avohou *et al.* (2011), Fischer *et al.* (2011), Sevel *et al.* (2012), Mugasha *et al.* (2013) donde algunos investigadores de estos estudios midieron cada rebrote como un solo tallo y otros realizaron podas en la cepa dejando uno o dos rebrotes, en los cuales se midió el diámetro del tallo (D) como variable predictora (x), con el propósito de encontrar el mejor ajuste en el modelo, la mayoría de estos estudios reportaron un coeficiente de determinación (R^2) superiores a 0,85 en la estimación de biomasa aérea (Ríos *et al.* 2016).

La estrategia adoptada para estimar la biomasa aérea y por componente en este estudio, en rebrotes de cepas de dos años, sin medir cada rebrote como árbol individual o realizar poda en la cepa, tan solo utilizando como variable predictora los dos rebrotes dominantes, el diámetro del cuello (dac), la altura total (H) y el conteo de rebrotes proventicios (vp), obtuvo buenos ajustes con el modelo alométrico en las tres especies estudiadas, tanto en biomasa aérea total y sus componente (tallo, rama y hojas) (Tabla 3).

Los modelos específicos por especie resultaron mejores que el modelo alométrico, utilizando diferente número de parámetros con diferente estructura de la variable predictora en las tres especies (*A. dealbata*, *E. denticulata* y *E. globulus*). Resultados similares en los reportados por Álvarez *et al.* (2005), donde modelaron la producción de biomasa aérea en *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* utilizando el modelo lineal simple $y = Xf(x, S) + e$ donde; X representa las variables independientes empleadas, S representa los parámetros del modelo a estimar y e es el error del modelo, resultando diferentes números de parámetros y variables predictoras en el modelo para las especies estudiadas, reportando un coeficiente de determinación (R^2) de hasta un 0.97 en *Eucalyptus globulus* y 0.91 en *Pinus pinaster* en la estimación de biomasa aérea. Razakamanarivo *et al.* (2012) evaluaron el modelo linealizado para estimar biomasa aérea y radicular en *Eucalyptus robusta*, con diferente variable predictora $\ln y_{agb} = Xb_0 + b_1 \ln(Db_i)$, donde (y_{agb}) es la biomasa aérea y (Db_i) es diámetro basal del tallo, midiendo cada rebrote como un tallo individual; mientras para la biomasa en raíz sustituyeron dentro del modelo, la variable dependiente (y_{bgb}) biomasa subterránea y circunferencia de la cepa como variable predictora. Para la corrección de sesgo de la transformación logarítmica, aplicaron el factor de corrección propuesto por Finney (1941), concluyendo que el modelo es efectivo para estimar la biomasa aérea y subterránea en *E. robusta*, mediante el uso del área basal y la circunferencia de la cepa respectivamente.

Por último, la incorporación de variables dummies ayudo, a identificar las diferencias estadísticas en los parámetros de regresión del modelo en la estimación de biomasa aerea a los 10, 21 y 31 meses de crecimiento, aumentando la precisión en la estimacion de esta variable. Herrero *et al.* (2014) al explicar las diferencias entre rodales plantados de monte bajo, utilizó

variables dummy mejorando sus modelos en la estimación de biomasa total en *E. globulus*. Pallardy *et al.* (2003) estudio la variable clonal de álamo incluyo variables dummy para separar los clones encontrando diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) en sus parámetros de regresión, mejorando el ajuste del modelo.

Conclusiones

El diámetro a la altura del cuello, la altura promedio de los dos principales rebrotes y el número total de rebrotes proventicios, están altamente correlacionados de manera importante tanto para la estimación de biomasa aérea total y de componentes (tallo, rama y hojas) así, evitando medir cada rebrote como tallo individual. Se pudo llegar a buenas estimaciones de biomasa aérea en *A. dealbata*, *E. denticulata* y *E. globulus* utilizados como cultivos dendroenergéticos a partir de rebrotes, el modelo alométrico general mostró menor ajuste en sus estadísticos de bondad, pero aceptable en comparación a lo reportado por otros autores, por otra parte los modelos empíricos probados por género fueron los que resultaron con mejores ajustes en sus estadísticos para la estimación de biomasa aérea total, o por componente y la inclusión de variables dummy mejoro los ajustes de los modelos al identificar las diferencias estadísticas de los parámetros del modelo para las tres fechas de evaluación

Referencia

- Al Afas NA, N Marron, S Van Dongen, I Laureysens, R Ceulemans. 2008. Dynamics of biomass production in a poplar coppice culture over three rotations (11 years). *Forest Ecology and Management* 255:1883-1891.
- Álvarez J, M Balboa, A Merino, R Rodríguez. 2005. Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. *Recursos Rurais* 1:21-31.
- Avohou H, R Houehounha, R Glele-Kakai, AE Assogbadjo, B Sinsin. 2011. Firewood yield and profitability of a traditional *Daniellia oliveri* short-rotation coppice on fallow lands in Benin. *Biomass and Bioenergy* 35:562-571.
- Camps M, F Marcos. 2002. Los biocombustibles. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa. 366 p.
- Fajman M, M Palát, P Sedlák. 2009. Estimation of the yield of poplars in plantations of fast-growing species within current results. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendeliana Brunensis* 57:25-36.
- Finney DJ. 1941. On the distribution of a variate whose logarithm is normally distributed. *Supplement to the Journal of the Royal Statistical Society* 7:155-161.
- Fischer M, M Trnka, J Ku era, M Fajman, Z Žalud. 2011. Biomass productivity and water use relation in short rotation poplar coppice (*Populus nigra* × *P. maximowiczii*) in the conditions of Czech Moravian Highlands. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendeliana Brunensis* 59:141-152.
- Geldres E, JE Shlatter, A Marcoleta. 2004. Monte Bajo, opción para tres especies de Eucaliptos en segunda rotación, un caso en la provincia de Osorno, Décima Región, Chile. *Bosque* 25:57-62.
- Hauk S, T Knoke, S Wittkopf. 2014. Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29:435-448.
- Herrero C, L Juez, C Tejedor, V Pando, F Bravo. 2014. Importance of root system in total biomass for *Eucalyptus globulus* in northern Spain. *Biomass and Bioenergy* 67:212-222.

- Hoogwijk M, A Faaij, B Eickhout, B de Vries, W Turkenburg. 2005. Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRES land-use scenarios. *Biomass and Bioenergy* 29:225-257.
- Laureysens I, J Bogaert, R Blust, R Ceulemans. 2004. Biomass production of 17 poplar clones in a short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics. *Forest Ecology and Management* 187:295-309.
- Liberloo M, C Calfapietra, M Lukac, D Godbold, ZB Luo, A Polle, MR Hoosbeck, O Kull, M Marek, C Raines, M Rubino, G Taylor, G Scarascia-Mugnozza, R Ceulemans. 2006. Woody biomass production during the second rotation of a bio-energy *Populus* plantation increases in a future high CO₂ world. *Global Change Biology* 12:1094-1106.
- Liberloo M, SY Dillen, C Calfapietra, S Marinari, BL Zhi, P De Angelis, R Ceulemans. 2005. Elevated CO₂ concentration, fertilization and their interaction: Growth stimulation in a short-rotation poplar coppice (EUROFACE). *Tree Physiology* 25:179-189.
- Mugasha WA, T Eid, OM Bollandas, RE Malimbwi, SAO Chamshama, E Zahabu, JZ Katani. 2013. Allometric models for prediction of above-and belowground biomass of trees in the miombo woodlands of Tanzania. *Forest Ecology and Management* 310:87-101.
- Pallardy S, D Gibbins, J Rhoads. 2003. Biomass production by two-year-old poplar clones on floodplain sites in the Lower Midwest, USA. *Agroforestry Systems* 59:21-26.
- Peña G. 2010. Desarrollo energético sustentable para el Chile del bicentenario: Las energías renovables en un contexto de políticas públicas. Santiago, Chile. Fundación Konrad Adenauer. 41 p.
- Razakamanarivo H, A Razakavololona, MA Razafindrakoto, G Vieilledent, A Albrecht. 2012. Below-ground biomass production and allometric relationships of eucalyptus coppice plantation in the central highlands of Madagascar. *Biomass and Bioenergy* 45:1-10.
- REN21. 2013. Renewables 2013 Global Status Report. Paris, Francia. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). 178 p.
- Richardson J, T Verwijst. 2007. Multiple benefits from sustainable bioenergy systems. *Biomass and Bioenergy* 31:599-600.
- Ríos SJC, CE Acuña, CJ Cancino, PR Rubilar, CJN Nívar, R Rosales Serna. 2016. Allometric equations commonly used for estimating shoot biomass in short-rotation wood energy

- species: a review. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 22:193-202.
- Rock J. 2007. Suitability of published biomass equations for aspen in Central Europe - Results from a case study. *Biomass and Bioenergy* 31:299-307.
- Röhle H, K-U Hartmann, D Gerold, C Steinke, J Schröder. 2006. Biomass functions for short rotation forestry. *Aufstellung von Biomassefunktionen für Kurzumtriebsbestände* 177:178-187.
- Santelices R, S Espinoza, A Cabrera. Year. Especies potenciales para la obtención de biomasa con fines energéticos en el secano mediterráneo de Chile. In Tercera edición del Congreso Latinoamericano de IUFRO, 12-15 de junio de 2013. 'Proceedings'. San José, Costa Rica. p.
- SAS Institute Inc. 2008. SAS/STAT 9.2 user's guide.
- Sevel L, T Nord-Larsen, K Raulund-Rasmussen. 2012. Biomass production of four willow clones grown as short rotation coppice on two soil types in Denmark. *Biomass and Bioenergy* 46:664-672.
- Sixto H, M Hernández, M Barrio, J Carrasco, I Cañellas. 2008. Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión. *Forest Systems* 16:277-294.
- Souza FC, GG Reis, dMGF Reis, HG Leite, RS Faria, JP Caliman, RA Barbosa, CHR Oliveira. 2015. Growth of intact plants and coppice in short rotation eucalypt plantations. *New Forests* 47:195-208.
- Vande I, N Van, L Van , K Verheyen, R Lemeur. 2007. Short-rotation forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) I-Biomass production after 4 years of tree growth. *Biomass and Bioenergy* 31:267-275.
- Villegas I. 2003. Manejo de rebrotes de *Eucalyptus globulus* Labillardière en el altiplano mexicano. Tesis Licenciatura. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. 86 p.
- Vita A, MT Serra, I Grez, M González, A Olivares. 1997. Respuesta del rebrote en espino (*Acacia caven* (Mol.) Mol.) sometido a intervenciones silviculturales en zona árida de Chile. *Ciencias Forestales* 12-13:4-18.

V. Crecimiento y rendimiento de biomasa aérea en rebrotes de tres cultivos dendroenergéticos

Resumen

El manejo de rebrotes en cultivos de corta rotación, se cree que aumenta significativamente la producción de biomasa con fines dendroenergéticos y es una alternativa económica evitando la replantación del cultivo. El objetivo del presente estudio fue estudiar en tres periodos de evaluación el crecimiento y rendimiento de biomasa aérea en rebrotes de cepas de dos años en tres cultivos dendroenergéticos. Se estudió *Eucalyptus globulus*, *E. denticulata*, y *Acacia dealbata*, en tres densidades de plantación (5000; 10000 y 15000 árboles ha⁻¹). Se detectó diferencias significativas en el tiempo, la especie y densidad de plantación en la mayoría de las variables evaluadas. La especie *E. globulus* reportó el mayor rendimiento en biomasa total, alcanzando valores de 32.4, 36.0, 41.9 toneladas ha⁻¹, en las densidades de plantación de 5000, 10000 y 15000 árboles ha⁻¹, respectivamente, la partición porcentual muestra una tendencia similar en las tres especies, el fuste en rebrotes a temprana edad, fue el componente de la cepa que aporta la mayor cantidad de biomasa a nivel de hectárea con un 60 % de la biomasa total, seguido por las hojas y las ramas. La menor tasa de mortalidad en rebrotes de las tres especies evaluadas la reporto la densidad de 15000 árboles ha⁻¹, donde *E. globulus* alcanzo hasta un 84 % de prendimiento de rebrote en cepas de dos años, seguido por *A. dealbata* (65%) y *E. denticulata* (60 %). La gestión de cultivos dendroenergeticos de corta rotación a partir de rebrotes puede ser utilizado en la producción de biomasa con fines energéticos.

Palabras clave. Corta rotación, rebrotes, producción, biomasa.

Introducción

Existen varias fuentes proveedoras de energía limpia, como la energía geotermal, hidráulica, eólica, solar y la proveniente de biomasa como las principales energías de carácter renovable (Zerta *et al.* 2008). Según la IEA (2011), actualmente cerca del 20% de los requerimientos energéticos mundiales son abastecidos por este tipo de energías. Dentro de estas fuentes, las más importantes son la hidráulica y la biomasa procedente del sector agrícola y forestal. La energía proveniente de biomasa o bioenergía corresponde a todas las fuentes de energía derivadas de material orgánico. La biomasa incluye bosques en pie, residuos forestales, cultivos energéticos, residuos agrícolas y efluentes de la agroindustria, abonos orgánicos y biogás (Camps y Marcos 2002). La energía proveniente de biomasa forestal recibe el nombre de dendroenergía, incluyendo toda energía obtenida a partir de biocombustibles sólidos, líquidos, gaseosos primarios (FAO 2005).

Los cultivos destinados a la producción de biomasa se caracterizan principalmente por su rápido crecimiento, altas densidades de plantación y susceptibles a rebrotar (Bergkvist y Ledin 1998, Bernardo *et al.* 1998, Forrest 2002, Forrest y Moore 2008, Hytönen y Kaunisto 1999, Laureysens *et al.* 2004, Onyekwelu 2007, Souza *et al.* 2015, Tahvanainen y Rytönen 1999, Vande *et al.* 2007). Entre los géneros y especies dendroenergéticas más importantes a nivel mundial se encuentran: eucalipto (*E. globulus*, *E. nitens*, *E. robusta*, *E. gomphocephala*, *E. camaldulensis*, *E. rudis*, *E. denticulata*), sauce (*Salix* spp), álamo (*Populus* spp), paulownia (*Paulownia* spp), acacia (*Acacia dealbata*, *A. melanoxylon* y *A. retinodes*) (Camps y Marcos 2002). El manejo de plantaciones a partir de rebrotes se originó en la década de 1960 en cultivos de rápido crecimiento para rotaciones menores de 15 años (Al Afas *et al.* 2008, Herrik y Brown 1967). Este tipo de cultivos se cree que aumenta significativamente la producción de biomasa con fines dendroenergéticos y es una alternativa económica evitando la replantación del cultivo (Mitchell 1992, Souza *et al.* 2015, Verwijst y Telenius 1999). Varios géneros han sido estudiados en producción de biomasa con fines energéticos, pero solo tres son los más reportados; *Salix*, *Populus* y *Eucalyptus*, atribuido principalmente por su rápido crecimiento y alta capacidad de brotación (Bullard *et al.* 2002, Mitchell 1992, Souza *et al.* 2015). En Chile existe poca información relacionada a la producción de biomasa con fines energéticos a partir de rebrotes,

por lo cual, el objetivo del presente trabajo fue estudiar en tres periodos de evaluación el crecimiento y rendimiento de biomasa aérea en rebrotes de cepas de dos años en tres cultivos dendroenergéticos.

Metodología

El estudio se realizó en el predio La Aguada, perteneciente a la comuna de Yumbel. Antecedentes generales del sitio y del diseño del ensayo se detallan en el capítulo II.

Para evaluar las características de estado del rebrote y su producción de biomasa las variables se midieron en el cuadrante cosechado en diciembre de 2012 correspondiente a la frecuencia de corte bianual. Hasta la fecha, se han llevado a cabo tres mediciones en este cuadrante: octubre de 2013, septiembre 2014 y septiembre 2015. Para las mediciones de las variables de estado se identificaron los dos principales rebrotes proventicios dominantes de cada cepa y se les midió, la altura total, el diámetro del cuello a nivel del suelo (D; 0.1 m sobre el suelo) y el diámetro a la altura del pecho (DAP) cuando estos rebrotes alcanzaron los 1.3 m, se midió el diámetro de la copa de todas las cepas en el núcleo de cada unidad experimental. El tipo de rebrote se definió según sus características físicas y posición, aquellos que brotaron en la corona de la cepa y en posición horizontal fueron identificados como adventicios y aquellos mejor unidos a la planta madre (cepa) y en posición vertical como rebrotes proventicios.

Determinación de biomasa a nivel de árbol y unidad de superficie. En las mismas fechas de medición de las variables de estado, la biomasa aérea observada se determinó utilizando muestras destructivas tomadas de tres cepas en la zona de la mitigación del efecto de borde de cada unidad experimental, cubriendo tanto la distribución diametral (D) como la altura total. Las cepas fueron cortadas a 0.1 m sobre el nivel del suelo, transportadas, y se almacenaron a 4 °C. En laboratorio cada muestra se separó por tipo de rebrote y se contaron tanto adventicios como proventicios, se les midió la altura total y el diámetro a la altura del cuello (Dac; 0.1 m). Posteriormente los componentes (tallos, rama y hojas) de cada rebrote fueron pesados en verde en una báscula digital de 0.01 g de precisión. Para la determinación del peso seco se tomaron muestras de cada componente de hasta 500 g, las que se secaron en estufa a 105 °C hasta peso

constante (Brown, 1997b; Schlegel *et al.*, 2000), posteriormente, de la razón entre el peso seco y el peso húmedo de la muestra, se calculó la biomasa seca total de cada componente en cada cepa y la biomasa total se obtuvo al sumar la biomasa de todos los componentes (Brassiolo *et al.* 2007).

Estimación de biomasa. Para estimar la biomasa a nivel de árbol se ajustó la relación de $y = Xb_0(\overline{dac}^2 | \bar{H} | nvp)^{b_1}$; donde y corresponde a la biomasa total de la cepa o de uno de sus componentes y $(\overline{dac}^2 | \bar{H} | nvp)$ es el producto del promedio de los diámetros al cuadrado por la altura promedio de los dos rebrotes dominantes, multiplicando por el número de rebrotes proventicios. Este procedimiento se utilizó en cada oportunidad de medición a los 10, 21 y 31 meses. La biomasa total y de componentes por unidad de superficie se obtuvo extrapolando con factor de expansión la biomasa estimada de los árboles en la unidad experimental útil a la densidad nominal de plantación (5000, 10000 y 15000 árboles ha⁻¹) (Cancino 2006).

Análisis de datos. El efecto de especie, densidad de plantación y la interacción de ambos sobre el rendimiento en biomasa total y de componentes, se determinó mediante el test de separación de medias de Tukey. Estos análisis fueron realizados mediante el programa SAS (Proc REG y Proc GML) (SAS Institute Inc. 2008). El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$y_{ijk} \sim \Gamma SP_i \Gamma B_j \Gamma D_k \Gamma SP f D_{ik} \Gamma E_{ijk}$$

$$i \text{ X1,..3}; j \text{ X1,..3}; k \text{ X1,..3}.$$

Donde, y_{ijk} = valor de la variable dependiente, observado en la especie i , en el bloque j , y densidad k ; μ = es la media general; SP_i = efecto del i -ésima especie; B_j = efecto del j -ésimo bloque; D_k = efecto de la k -ésima densidad; $SP f D_{ik}$ = efecto de la interacción entre la i -ésima especie y la k -ésima densidad.

Resultados

En la mayoría de las variables evaluadas se obtuvieron diferencias significativas ($\alpha = 0.05$). Como era de esperarse, el factor edad mostró diferencias altamente significativas sobre todas las variables analizadas en este estudio. Otro efecto que mostró alta significancia fue la especie con excepción en la variable altura y número de rebrotes proventicios (Nvp), la densidad también mostro diferencias significativas en todas las biomasa y el diámetro a la altura del cuello (Dac), mostrando efecto no significativo en las variables Nvp y altura, la interacción especie y densidad solo mostro diferencias significativas en Nvp (Tabla 9).

Tabla 8. Probabilidades obtenidas del análisis de varianza para los efectos evaluados en la biomasa aérea total y por competentes, número de rebrotes, diámetro y altura.

| Efecto | Biomasa | | | | Nvp | Dac | Altura |
|------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | Total | Tallo | Rama | Hojas | | | |
| Edad | <.0001 | <.0001 | <.0001 | <.0001 | <.0001 | <.0001 | <.0001 |
| Especie | <.0001 | <.0001 | <.0001 | <.0001 | 0.0257 | 0.0186 | <.0001 |
| Densidad | 0.0123 | 0.0367 | 0.0035 | 0.0018 | 0.7978 | <.0001 | 0.0263 |
| Especie×densidad | 0.7441 | 0.8254 | 0.6596 | 0.5016 | 0.0242 | 0.8846 | 0.6909 |

Nvp: Número de rebrotes proventicios, Dac: Diámetro a la altura del cuello. Fuente: Elaboración propia.

En el ensayo, transcurrido los 31 meses desde la brotación de las cepas de árboles cosechados a los dos años de edad. La especie *E. globulus* registró un alto rendimiento en biomasa total, con respecto al resto de las especies evaluadas, con valores de 32.4 Mg ha⁻¹ en la densidad de plantación de 5000 árboles ha⁻¹, 36.0 Mg ha⁻¹ para la densidad de 10000 árboles ha⁻¹ y en la densidad más grande (15000 árboles ha⁻¹) alcanzo valores de hasta 41.9 Mg ha⁻¹ (Tabla 10; Figura 7). En este estudio le siguió *E. denticulata* que acumulo biomasa a partir de rebrotes con 9.9 Mg ha⁻¹ (5000 árboles ha), 26.6 Mg ha⁻¹(10000 árboles ha⁻¹) y 24.6 (15000 árboles ha⁻¹) y *A. dealbata* reporto menor rendimiento en biomasa con 2.6, 10.4, 14.2 Mg ha⁻¹ en las densidades 5000, 10000 y 15000 árboles ha⁻¹, respectivamente.

Las especies de *Eucalyptus* superaron significativamente a la especie *A. dealbata* en el rendimiento de biomasa aérea total, en la mayoría de los casos se observó que a mayor densidad de plantación mayor que el rendimiento en biomasa, excepto en *E. denticulata* donde se observa una disminución en la producción de biomasa total en la densidad de 15000 árboles ha⁻¹, en comparación con la densidad de 10000 árboles ha⁻¹, donde a partir de los 25 meses el rendimiento fue mayor, esto atribuido a la disminución de rebrotes o rebrotes en la densidad mayor (15000 árboles ha⁻¹) (Tabla 10, Figura 7).

Tabla 9. Crecimiento y rendimiento promedio de biomasa obtenida transcurrido 31 meses de edad de los cultivos, según componente, densidad de plantación, especie y variables de estado.

| Variable | Densidad | <i>A. dealbata</i> | <i>E. denticulata</i> | <i>E. globulus</i> |
|------------------------------------------|----------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| Biomasa total (Mg ha ⁻¹) | 5000 | 2.6 Ac | 9.9 Ab | 32.4 Aa |
| | 10000 | 10.4 Bc | 26.6 Bb | 36.0 ABa |
| | 15000 | 14.2 Bc | 24.6 Bb | 41.9 Ba |
| Biomasa tallos (Mg ha ⁻¹) | 5000 | 1.6 Ac | 5.5 Ab | 21.0 Aa |
| | 10000 | 6.7 Bc | 14.6 Bb | 22.7 ABa |
| | 15000 | 8.7 Bb | 13.0 Bb | 25.5 Ba |
| Biomasa ramas (Mg ha ⁻¹) | 5000 | 0.4 Ac | 1.7 Ab | 4.5 Aa |
| | 10000 | 1.5 A Bb | 4.5 Ba | 5.1 Aa |
| | 15000 | 2.5 Bc | 4.3 Bb | 6.1 Ba |
| Biomasa hojas (Mg ha ⁻¹) | 5000 | 0.6 Ac | 2.8 Ab | 6.9 Aa |
| | 10000 | 2.2 Bc | 7.5 Bb | 8.2 Ba |
| | 15000 | 3.1 Cc | 7.3 Bb | 10.3 Ca |
| Nvp | 5000 | 3 Aa | 3 Aa | 2 Aa |
| | 10000 | 4 Aa | 2 Aa | 2 Aa |
| | 15000 | 4 Aa | 2 Aa | 2 Aa |
| Dac (mm) | 5000 | 60.2 Ab | 56.9 Aab | 65.7 Aa |
| | 10000 | 53.0 Bb | 49.6 Bb | 57.3 Ba |
| | 15000 | 33.7 Cb | 42.4 Ca | 43.0 Ca |
| Altura (m) | 5000 | 4.3 Ac | 5.2 Ab | 7.3 Aa |
| | 10000 | 4.7 Ab | 4.7 ABb | 6.9 Aa |
| | 15000 | 3.4 Bc | 4.8 Bb | 5.9 Ba |

Nvp: Número de rebrotes proventicios, Dac: Diámetro a la altura del cuello; diferentes letras mayúsculas muestran diferencias significativas entre densidades de plantación de la misma especie; letras minúsculas muestran diferencias significativas entre especies. Fuente: Elaboración propia.

En general, la acumulación de biomasa por unidad de superficie en el periodo evaluado (10,21 y 31 meses) de las tres especies se encuentra en su crecimiento juvenil (Figura 7). *A. dealbata* en todas las densidades de plantación obtuvo bajos rendimientos en biomasa en contraste a lo observado en las especies de *Eucalyptus*, y en la densidad de 5000 árboles ha^{-1} entre los 10 y 21 meses, se observó una baja o nula acumulación de biomasa, esto debido a la alta mortalidad ocurrida en esta especie. *E. globulus* en el mismo periodo muestra una acumulación de biomasa total similar en las densidades de 5000 y 10000 árboles ha^{-1} (Figura 7). En todas las especies y densidades de plantación, tanto el crecimiento en altura como el diámetro (Dac), mostraron diferencias significativas entre especies y densidades de plantación. Los rebrotes al final de los 31 meses de medición no mostraron diferencias estadísticas entre densidades y especies registrando promedios entre 3-4 vastagos para *Acacia dealbata*, 2-3 en *E. denticulata* y 2 para *E. globulus* (Tabla 10).

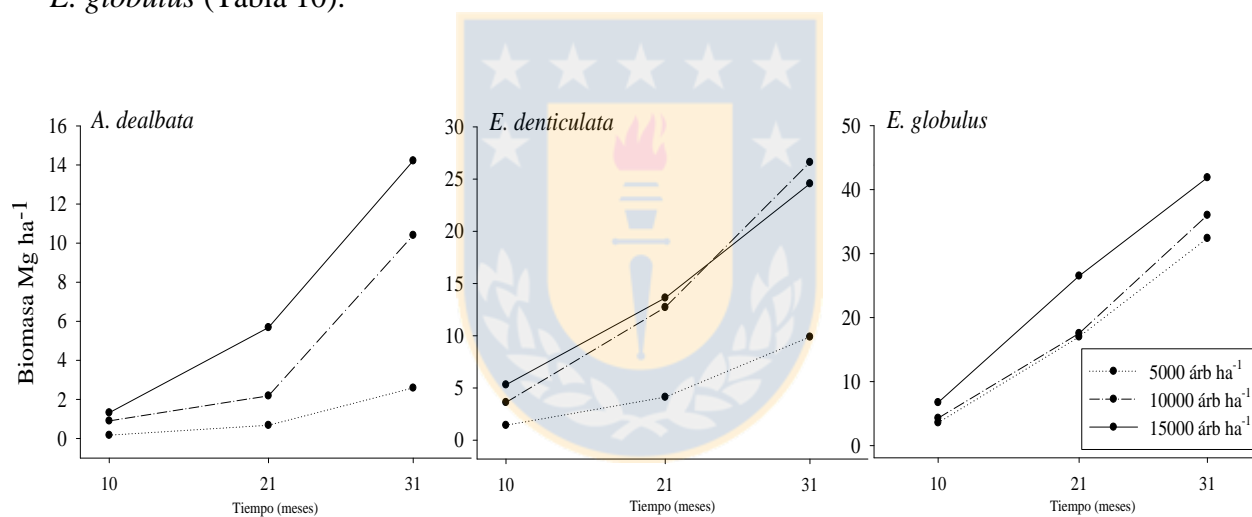


Figura 7. Evolución del rendimiento de biomasa en rebrotes de cepas de dos años en cultivos dendroenergéticos. Fuente: Elaboración propia.

En todas las especies la participación porcentual de los tres componentes de la biomasa muestra una tendencia similar. En general, desde los 10 meses y hasta el final de la evaluación, el tallo fue el componente de la cepa que aportó el mayor porcentaje de biomasa por unidad de superficie, seguido por las hojas y las ramas (Figura 8). En *A. dealbata* y *E. globulus* en todas las densidades la proporción de tallo a partir de rebrotes supera el 60%, le siguió *E. denticulata* con una biomasa porcentual de tallos de hasta un 50%, esto superior a lo reportado por Sandoval (2011) donde evaluó el crecimiento y rendimiento de biomasa aérea en cultivos

dendroenergéticos uni-fustales, reportando una biomasa porcentual en este componente no superior al 20%. En general el particionamiento de biomasa aérea varió con la edad del cultivo. En las tres especies la biomasa porcentual del componente tallo muestra una tendencia ascendente y superó significativamente la biomasa en ramas y hojas en los tres períodos de evaluación, la biomasa porcentual de hojas osciló entre los 25 y 30 %, disminuyendo en el transcurso del tiempo para las especies de *Eucalyptus* y manteniéndose constante en *A. dealbata*. El componente ramas fue el que mostró menor porcentaje de biomasa entre el 15 y 20%, con una tendencia casi constante a lo largo del tiempo para las especies de *Eucalyptus* y *A. dealbata* (Figura 8).

A los 31 meses desde la evaluación de los rebrotes, la proporción de fuste domina y aumenta gradualmente; se evidencia la baja proporción de biomasa a partir de ramas y en tanto que la biomasa proveniente de hojas disminuye a lo largo del tiempo.



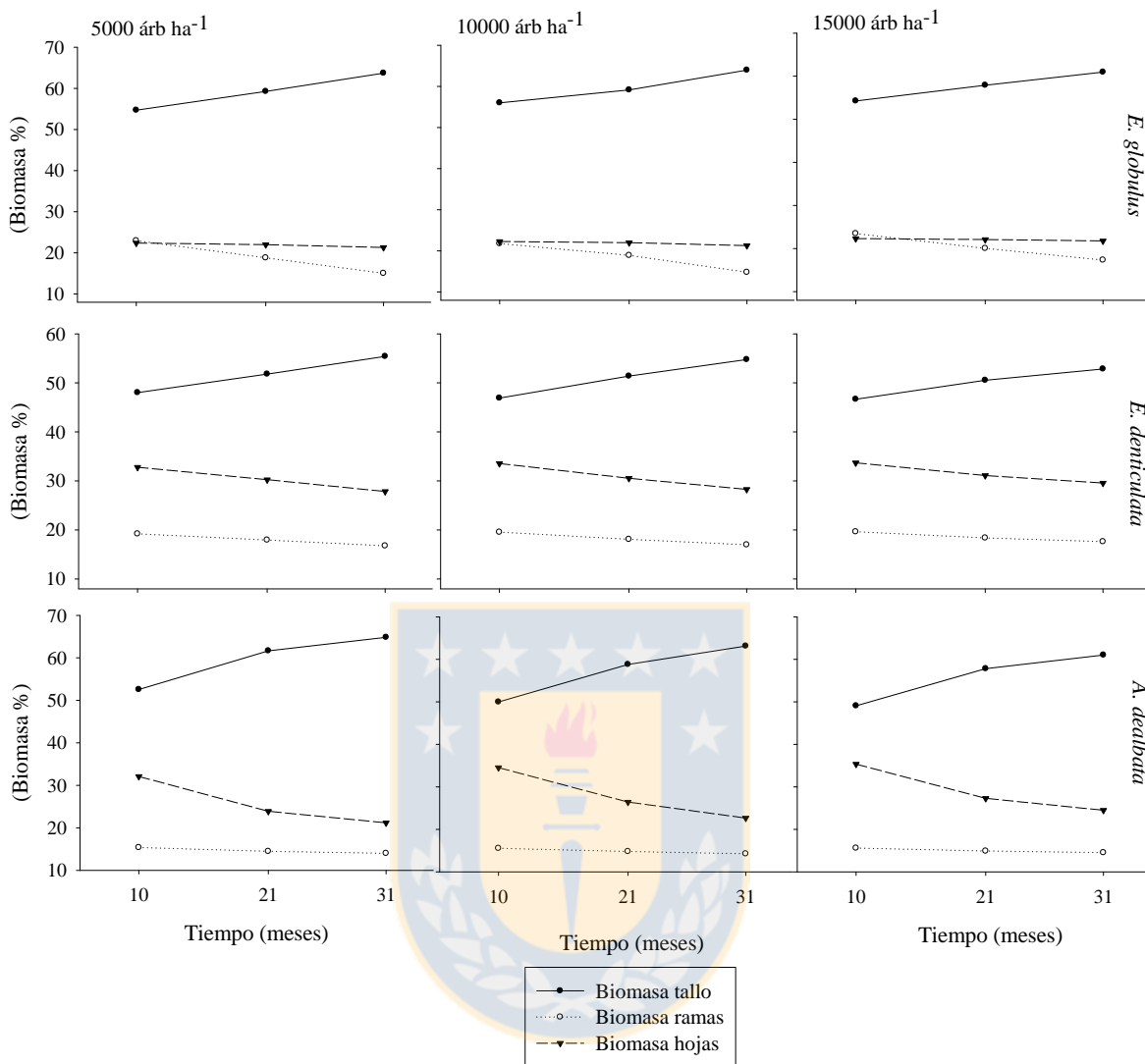


Figura 8. Particionamiento de la biomasa por hectárea en cultivos dendroenergéticos manejados a partir de rebrotes. Fuente: Elaboración propia.

La mortalidad mostro efecto significativo en especies, densidad de plantación y la interacción de ambas, siendo *E. globulus* la especie con mayor porcentaje de sobrevivencia al final de la primera rotación hasta con un 91 % en la densidad de 5000 árboles ha^{-1} , seguido por 80 y 74 % en las densidades de 15000 y 10000 árboles ha^{-1} , respectivamente. En contraste, *E. denticulata* presentó menor sobrevivencia en 5000 árboles ha^{-1} con un 70 % aumentando a 77 % en las dos densidades restantes (10000 y 15000 árboles ha^{-1}). *A. dealbata* fue la especie que presentó el

menor porcentaje de sobrevivencia con valores inferiores a 30 % en la densidad de 10000 árboles ha⁻¹ y un 56 % para las densidades de 5000 y 15000 árboles ha⁻¹ (Figura 9).

En rebrotes también se mostraron diferencias significativas ($\alpha = 0.05$) en los efectos evaluados, la menor tasa de mortalidad de las tres especies estudiadas fue en la densidad de 15000 árboles ha⁻¹, donde *E. globulus* alcanzó hasta un 84 % de supervivencia (26 meses), seguido por *A. dealbata* (65%) y *E. denticulata* (60 %). Para las tres especies estudiadas la variación de mortalidad de rebrotes en el transcurso del tiempo se muestra una tendencia constante, manteniendo la supervivencia de las cepas rebrotadas obtenidas de la primera rotación de los árboles uni-fustales (Figura 9).

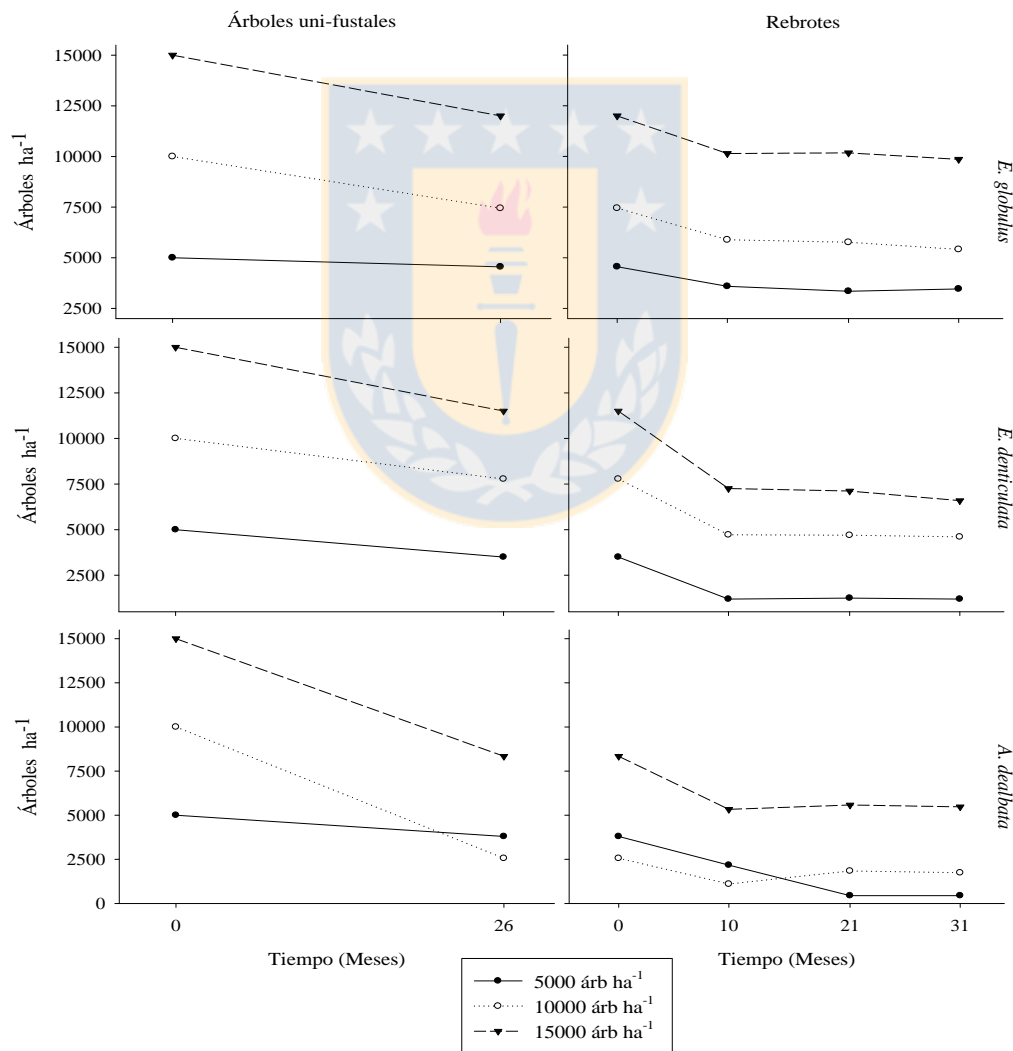


Figura 9. Supervivencia observada en los cultivos dendroenergéticos de árboles uni-fustales y cepas rebrotadas (rebrotas). Fuente: Elaboración propia.

Discusión

Existen varios estudios de rendimiento y producción de biomasa que han sido evaluados en Chile (Acuña *et al.* 2010, Geldres *et al.* 2006, Muñoz *et al.* 2005, Muñoz *et al.* 2008, Schlegel 2001), pero poca es la información relacionada a cultivos dendroenergéticos (Rodríguez 2015, Sandoval *et al.* 2012). Los estudios sobre el rendimiento de biomasa en rebrotas son bastante recientes en el país (Geldres *et al.* 2004). De las variables de estado evaluadas, la especie *Eucalyptus globulus* creció más en Dac y altura en contraste con las otras dos especies estudiadas, siendo la diferencia significativa en la mayoría de los niveles de densidad de plantación, resultados similares reportados por Geldres *et al.* (2004), donde evaluaron la variables de estado en rebrotas de *E. globulus*, *E. viminalis* y *E. regnans* encontrando el mayor crecimiento en diámetro y altura en retoños de *E. globulus*.

La especie *A. dealbata* no mostró buen crecimiento en diámetro y altura, ya que esta es muy sensible a la radiación y al cortar en temporadas con alta radiación y extraer al instante el material cosechado dejando la cepa expuesta directamente al sol, esto provoca la cicatrización de los vasos vasculares propiciando la muerte de la cepa (Pinilla y Hernández 2010). Aunque varios autores han enfatizado acerca de la gran adaptabilidad de las especies del género *Acacia* a condiciones ambientales desfavorables (Hussain y Gul 1991, McKinnell 1990, Sandoval *et al.* 2012, Thomson 1986),

El rendimiento de biomasa en *E. globulus* (40 Mg ha^{-1}) y *E. denticulata* (26 Mg ha^{-1}) supera hasta tres y dos veces respectivamente la producción de biomasa de los cultivos de primera rotación o uni-fustales, respecto a los estudios reportados por Sandoval (2011) y Rodríguez (2015) los cuales evaluaron el rendimiento de biomasa inicial en *E. globulus* en plantaciones dendroenergéticas de árboles uni-fustales obteniendo hasta 10 Mg ha^{-1} en periodos cortos de evaluación. Sochacki *et al.* (2007) afirman que plantaciones de *E. globulus* de 4000 árboles ha^{-1} acumulan hasta 16.6 Mg ha^{-1} de material seco al tercer año de establecida la plantación en

la primera rotación. En rebrotes este rendimiento se logró a los 21 meses en la densidad de 5000 árboles ha⁻¹ en la misma especie. Rendimientos similares en rebrotes fueron encontrados por Al Afas *et al.* (2008), donde estudiaron la dinámica de producción de biomasa en SRC de álamos en tres rotaciones (2, 3 y 4 años), reportando entre 30 y 25 Mg ha⁻¹ para las tres rotaciones estudiadas. Souza *et al.* (2015) estudiaron el crecimiento de árboles uni-fustales y rebrotes en plantaciones de eucalipto de rotación corta donde demuestran que el crecimiento y rendimiento de biomasa es mayor en rebrotes (SRC) en edades tempranas que en plantaciones tradicionales uni-fustales. En la mayoría de los clones estudiados de este estudio muestra mayor rendimiento de biomasa en rebrotes hasta los 48 meses de edad, en contraste con la plantación uni-fustal donde el rendimiento es mayor que SRC a partir de los 60 meses de edad (Souza *et al.* 2015). Estudios similares han reportado que la biomasa de *Salix*, *Eucalyptus* y *Acacia* son significativamente más altos que en la primera rotación cuando son cosechados en la edad de tres años (Sims *et al.* 2001).

El crecimiento rápido de SRC en edades más tempranas es el resultado de la utilización de las reservas orgánicas e inorgánicas de la cepa a partir del sistema radicular, así como agua y absorción de nutrientes por el sistema establecido de la raíz (Drake *et al.* 2012, Kabeya y Sakai 2005, Oliveira *et al.* 1994, Reis y Hall 1986). La reducción de la tasa de crecimiento y acumulación de biomasa en rebrotes después de los 60 meses, puede explicarse por la competencia entre individuos por la luz, suelo, agua y nutrientes, entre otros (Souza *et al.* 2015). Otro factor importante en el rendimiento en edades mayores es la falta de fertilización de rebrotes, que puede explicar el bajo rendimiento en las últimas etapas (Cavichiollo *et al.* 2004, Dedecek y Gava 2005, Faria *et al.* 2002, Miranda *et al.* 1998, Silva 2013).

Las variables de estado, diámetro a la altura del cuello (Dac) y la altura del rebrote dominante mostraron diferencias significativas entre densidades de plantación, disminuyendo a mayor densidad, efecto similares se han presentado en estudios de árboles uni-fustales en altas densidades donde el Dac y la altura disminuyen o tienen mayor variabilidad al incrementar la densidad (Fredericksen y Zedaker 1995, Misra *et al.* 1998, Pinkard y Neilsen 2003, Srivastava *et al.* 1999). En un ensayo dendroenergético donde se evaluó *E. globulus*, Sandoval (2011) encontró que el rendimiento inicial en biomasa disminuye a medida que aumenta la densidad de

rodal, resultado explicado por el evidente menor tamaño de los árboles al competir por espacio y nutrientes. En rebrotes sucedió lo contrario, la densidad de plantación más alta mostro mayor producción de biomasa, esto atribuido a la multiplicatoria de rebrotes, registrando de dos a tres tallos por cepa a los 31 meses de evaluación.

Para las tres especies, la biomasa proveniente del fuste es mayor desde la primera fecha de evaluación (10 meses) incrementando en el transcurso del tiempo. Lo contrario ocurre en los componentes ramas y hojas los cuales se mantienen en bajas proporciones o disminuye en pequeña cantidad. Esto contrasta a lo reportado por Sandoval (2011) y Rodríguez (2015) en estudios de partición de biomasa de plantaciones dendroenergéticas uni-fustales, donde a medida que aumenta la edad de la plantación, la biomasa proveniente del fuste incrementa significativamente después de los 35 meses. También Misra *et al.* (1998), mencionan que con el crecimiento de los árboles o cuando la producción de biomasa incrementa con la edad, la contribución del follaje, raíces finas y medias a la biomasa total disminuye asintóticamente, mientras que la contribución del fuste, ramas y raíces gruesas incrementan significativamente, esto para plantaciones uni-fustales pero en rebrotes la respuesta a la proporción de biomasa es favorable a la biomasa en el fuste desde el inicio del crecimiento.

En la supervivencia, la especie más sensible en árboles uni-fustales fue *A. dealbata* reportando el mayor porcentaje de mortalidad, probablemente debido al pequeño tamaño de las plantas al momento de establecer la plantación, lo cual condicionó sustancialmente la supervivencia. Esos resultados, que concuerdan con lo establecido por otros autores, quienes estudiando varias especies de *Acacias* desde su establecimiento, han resaltado el tamaño de la planta y los cuidados en el establecimiento de este género a condiciones edafoclimáticas desfavorables (Aref *et al.* 2003, Hussain y Gul 1991). En este estudio se observó que la densidad de plantación más alta reportó la mayor tasa de mortalidad en árboles uni-fustales, resultados similares a los reportados por (Sandoval 2011, Srivastava *et al.* 1999).

Por otra parte, la mortalidad de los rebrotes fue menor en *E. globulus*, mostrando el mayor porcentaje de cepas rebrotadas (84 %) seguido por *E. denticulata* (70%) registrando una tendencia casi constante en la sobrevivencia en el trascurso del tiempo. Resultados similares

reportó Al Afas *et al.* (2008) en Álamo registrando en algunos clones hasta un 94 % de sobrevivencia en rebrotes y una tendencia a lo largo de la rotación similar a lo reportado en este estudio. La densidad de plantación solo mostro efecto significativo en *A. dealbata* donde a menor densidad mayor la mortalidad esto ocasionado principalmente por plagas de tipo lagomorfos y la exposición de la cepa a las altas temperaturas provocando cicatrización, otros estudios reportan que la atribución a la mortalidad del rebrote de algunas especies es por la escasa capacidad de enraizamiento de la cepa o planta madre (Dickmann y Stuart 1983).

Conclusión

Transcurridos 31 meses de crecimiento en rebrotes, el rendimiento en biomasa total fue significativamente mayor en las especies de *Eucalyptus* en contraste con *A. dealbata*, los mayores rendimientos en biomasa aérea por hectárea fueron obtenidos en *E. globulus* en la densidad de plantación mayor. El rendimiento entre las especies difiere significativamente, indicando que la especie con mayor capacidad de rebrote en este caso *E. globulus* es la más adecuada para ser establecida en cultivos dendroenergéticos, ya que permitiría varios ciclos de corta después de su establecimiento inicial. El crecimiento en diámetro (Dac) y altura total fue significativamente mayor en las especies de *Eucalyptus* en contraste con *A. dealbata*. Aun así, esto no descartaría la utilización de esta especie en cultivos dendroenergéticos a partir de rebrotes ya que el resultado puede deberse a diferencias durante la fase de establecimiento. El particionamiento en biomasa varió entre las especies. El fuste es el componente del árbol que más aporta a la biomasa total en cortos periodos de crecimiento, seguido por las ramas y las hojas. La gestión de cultivos dendroenergeticos a partir de rebrotes evita los costos de replantación y pueden ser utilizados en la producción de biomasa con fines energéticos, incrementando el rendimiento de biomasa por unidad de superficie en comparación a cultivos uni-fustales.

Referencias

- Acuña E, M Espinosa, J Cancino, R Rubilar, F Muñoz. 2010. Estimating the bioenergy potential of *Pinus radiata* plantations in Chile. *Ciencia e Investigacion Agraria* 37:93-102.
- Al Afas NA, N Marron, S Van Dongen, I Laureysens, R Ceulemans. 2008. Dynamics of biomass production in a poplar coppice culture over three rotations (11 years). *Forest Ecology and Management* 255:1883-1891.
- Aref IM, LI El-Juhany, SS Hegazy. 2003. Comparison of the growth and biomass production of six acacia species in Riyadh, Saudi Arabia after 4 years of irrigated cultivation. *Journal of Arid Environments* 54:783-792.
- Bergkvist P, S Ledin. 1998. Stem biomass yields at different planting designs and spacings in willow coppice systems. *Biomass and Bioenergy* 14:149-156.
- Bernardo A, M Reis, G Reis, R Harrison, D Firme. 1998. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*, *E. pellita* and *E. urophylla* plantations in southeastern Brazil. *Forest Ecology and Management* 104:1-13.
- Blake TJ. 1983. Coppice systems for short-rotation intensive forestry: the influence of cultural, seasonal and plant factors. *Australian Forest Research* 13:279-291.
- Brassiolo M, C Gomez, M Abt. 2007. Regeneración de un rodal de Tipa blanca utilizando brotes de cepas [Método de Monte Bajo]. *Revista de Ciencia y Tecnología* 3:44-53.
- Brown S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. Rome. FAO Forestry Paper 134. 55 p.
- Bullard M, S Mustill, S McMillan, P Nixon, P Carver, C Britt. 2002. Yield improvements through modification of planting density and harvest frequency in short rotation coppice *Salix* spp. -1. Yield response in two morphologically diverse varieties. *Biomass and Bioenergy* 22:15-25.
- Camps M, F Marcos. 2002. Los biocombustibles. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa. 366 p.
- Cancino J. 2006. Dendrometría básica. Concepción, Chile. Dirección de docencia, Universidad de Concepción. 62 p.
- Cavichiollo S, R Dedecek, J Gava. 2004. Preparo do solo e o estado nutricional da rebrota de *Eucalyptus saligna*. *Scientia Forestalis* 66:120-127.

- Dedecek RA, JL Gava. 2005. Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. *Revista Árvore, Viçosa* 29:383-390.
- Dickmann DI, KW Stuart. 1983. The culture of poplars in Eastern North America The culture of poplars in Eastern North America. Michigan State University, East Lansing, MI, USA. p. 168.
- Drake PL, DS Mendham, DA White, GN Ogden, B Dell. 2012. Water use and water-use efficiency of coppice and seedling *Eucalyptus globulus* Labill.: A comparison of stand-scale water balance components. *Plant and Soil* 350:221-235.
- FAO. 2005. Global forest resource assessment. Key findings. *United Nations Food Agricultural Organisation*.
- Faria GE, NF Barros, RF Novais, JC Lima, JL Teixeira. 2002. Produção e estado nutricional de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em segunda rotação, em resposta à adubação potássica. *Revista Árvore* 26:577-584.
- Forrest M. 1985. Trees and shrubs cultivated in Ireland. Kilkenny, UK. Boethius Press. 223 p.
- Forrest M. 2002. The performance of a *Eucalyptus gunnii* cut foliage plantation over 7 years. *Irish Journal of Agricultural and Food Research* 41:235-245.
- Forrest M, T Moore. 2008. *Eucalyptus gunnii*: A possible source of bioenergy? *Biomass and Bioenergy* 32:978-980.
- Fredericksen TS, SM Zedaker. 1995. Fine root biomass, distribution, and production in young pine-hardwood stands. *New Forests* 10:99-110.
- Geldres E, V Gerding, JE Schlatter. 2006. Biomasa de *Eucalyptus nitens* de 4-7 años de edad en un rodal de la X Región, Chile. *Bosque* 27:223-230.
- Geldres E, JE Shlatter, A Marcoleta. 2004. Monte Bajo, opción para tres especies de Eucaliptos en segunda rotación, un caso en la provincia de Osorno, Décima Región, Chile. *Bosque* 25:57-62.
- Herrick A, C Brown. 1967. A new concept in cellulose production-silage sycamore. *Agr. Sci.* 5:8-13.
- Hummel FC, W Palz, G Grassi. 1988. Biomass forestry in Europe: a strategy for the future. London/New York. Elsevier Applied Science. 142 p.
- Hussain A, P Gul. 1991. Selection of suitable tree species for saline and waterlogged areas. *Pakistan journal of Forestry* 41:34-43.

- Hytönen J, S Kaunisto. 1999. Effect of fertilization on the biomass production of coppiced mixed birch and willow stands on a cut-away peatland. *Biomass and Bioenergy* 17:455-469.
- IEA. 2011. Renewables Information 2011. Luxemburgo. International Energy Agency, OECD Publishing, 498 p.
- Kabeya D, S Sakai. 2005. The relative importance of carbohydrate and nitrogen for the resprouting ability of *Quercus crispula* seedlings. *Annals of Botany* 96:479-488.
- Laureysens I, J Bogaert, R Blust, R Ceulemans. 2004. Biomass production of 17 poplar clones in a short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics. *Forest Ecology and Management* 187:295-309.
- Macfarlane C, MA Adams, DA White. 2004. Productivity, carbon isotope discrimination and leaf traits of trees of *Eucalyptus globulus* Labill. in relation to water availability. *Plant, Cell and Environment* 27:1515-1524.
- McKinnell F. 1990. Species trials on alkaline soils in Indonesia. *Forestry Newsletter* 10:1-3.
- Miranda G, N Barros, H Leite, L Couto, J Teixeira. 1998. Produção de povoamentos de eucalipto em regime de talhadia, em função da adubação e da distribuição da galhada da rotação anterior, no Vale do Jequitinhonha-MG. *Revista Árvore* 22:307-314.
- Misra RK, CRA Turnbull, RN Cromer, AK Gibbons, AV Lasala. 1998. Below- and above-ground growth of *Eucalyptus nitens* in a young plantation I. Biomass. *Forest Ecology and Management* 106:283-293.
- Mitchell CP. 1992. Ecophysiology of short rotation forest crops. *Biomass and Bioenergy* 2:25-37.
- Muñoz C, J Cancino, M Espinosa. 2005. Análisis de biomasa del vuelo de un rodal adulto de *Pinus radiata*. *Bosque (Valdivia)* 26:33-44.
- Muñoz F, R Rubilar, M Espinosa, J Cancino, J Toro, M Herrera. 2008. The effect of pruning and thinning on above ground aerial biomass of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden. *Forest Ecology and Management* 255:365-373.
- Oliveira V, R Novais, J Neves, N Barros, P Leal. 1994. Raízes e tocos de mudas de *Eucalyptus* como fonte de nutrientes para as brotações. *Revista Árvore* 18:22-32.

- Onyekwelu J. 2007. Growth, biomass yield and biomass functions for plantation-grown *Nauclea diderrichii* (de wild) in the humid tropical rainforest zone of south-western Nigeria. *Bioresource Technology* 98:2679-2687.
- Pinkard E, W Neilsen. 2003. Crown and stand characteristics of *Eucalyptus nitens* in response to initial spacing: Implications for thinning. *Forest Ecology and Management* 172:215-227.
- Reed D, M Tomé. 1998. Total aboveground biomass and net dry matter accumulation by plant component in young *Eucalyptus globulus* in response to irrigation. *Forest Ecology and Management* 103:21-32.
- Reis GG, AE Hall. 1986. Respostas de brotações de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. submetidas a diferentes níveis de deficiência hídrica. *Revista Árvore* 10:16-26.
- Rodríguez J. 2015. Modelación de biomasa en plantaciones de *Eucalyptus* sp. y *Pinus radiata* para fines energéticos, según densidad de plantación y turno de rotación en suelos arenales, sedimentos marinos y trumaos en la Región del Biobío, Chile. Tesis Doctor en Ciencias Forestales. Dirección de Postgrado. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción. 139 p.
- Sandoval S. 2011. Modelación de crecimiento y rendimiento de biomasa en cultivos dendroenergéticos. Tesis Doctor en Ciencias Forestales. Dirección de Postgrado. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción. 194 p.
- Sandoval S, J Cancino, R Rubilar, E Esquivel, E Acuña, F Muñoz, M Espinosa. 2012. Probability distributions in high-density dendroenergy plantations. *Forest Science* 58:663-672.
- SAS Institute Inc. 2008. SAS/STAT 9.2 user's guide.
- Schlegel B. Year. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. In Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales, 18-20 octubre. 'Proceedings'. Valdivia, Chile. 13 p.
- Schlegel B, J Gayoso, J Guerra. 2000. Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Proyecto Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Valdivia, Chile. FONDEF-UACH-INFOR. 20 p.

- Silva NF. 2013. Produtividade, demanda e eficiência nutricional de clones de eucalipto em regime de alto fuste e talhadia. Tesis Dissertation, Universidade Federal de Viçosa. 52 p.
- Sims R, T Maiava, B Bullock. 2001. Short rotation coppice tree species selection for woody biomass production in New Zealand. *Biomass and Bioenergy* 20:329-335.
- Sochacki SJ, RJ Harper, KRJ Smettem. 2007. Estimation of woody biomass production from a short-rotation bio-energy system in semi-arid Australia. *Biomass and Bioenergy* 31:608-616.
- Souza FC, GG Reis, dMGF Reis, HG Leite, RS Faria, JP Caliman, RA Barbosa, CHR Oliveira. 2015. Growth of intact plants and coppice in short rotation eucalypt plantations. *New Forests* 47:195-208.
- Srivastava N, VL Goel, HM Behl. 1999. Influence of planting density on growth and biomass productivity of *Terminalia arjuna* under sodic soil sites. *Biomass and Bioenergy* 17:273-278.
- Tahvanainen L, VM Rytönen. 1999. Biomass production of *Salix viminalis* in southern Finland and the effect of soil properties and climate conditions on its production and survival. *Biomass and Bioenergy* 16:103-117.
- Thomson LAJ. Year. Australian acacias for saline, alkaline soils in the hot, dry subtropics and tropics. In Australian acacias in developing countries: proceedings of an international workshop held at the Forestry Training Centre, 4-7 August 1986. 'Proceedings'. Gympie, Qld., Australia. 66-69 p.
- Vande I, N Van, L Van, K Verheyen, R Lemeur. 2007. Short-rotation forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) I-Biomass production after 4 years of tree growth. *Biomass and Bioenergy* 31:267-275.
- Verwijst T, B Telenius. 1999. Biomass estimation procedures in short rotation forestry. *Forest Ecology and Management* 121:137-146.
- White D, M Battaglia, C Macfarlane, D Mummery, J McGrath, C Beadle. 2003. Selecting species for recharge management in Mediterranean south western Australia - Some ecophysiological considerations. *Plant and Soil* 257:283-293.

- Wood M, N Stephens, B Allison, C Howell. 2001. Plantations of Australia. A report from the National Plantation Inventory and the National Farm Forest Inventory. Bureau of Rural Sciences, Canberra. 172 p.
- Xu D, B Dell, N Malajczuk, M Gong. 2001. Effects of P fertilisation and ectomycorrhizal fungal inoculation on early growth of eucalypt plantations in southern China. *Plant and Soil* 233:47-57.
- Zerta M, P Schmidt, C Stiller, H Landinger. 2008. Alternative World Energy Outlook (AWEO) and the role of hydrogen in a changing energy landscape. *International Journal of Hydrogen Energy* 33:3021-3025.



VI. Ecuaciones alométricas de uso común para estimar biomasa en rebrotes de especies dendroenergéticas de corta rotación-una revisión²

Resumen

Los cultivos dendroenergéticos de corta rotación en monte bajo (short rotation coppice-SRC), comúnmente están formados por individuos uni-fustales en el primer ciclo de corta, pero a partir del segundo ciclo, de cada cepa surgen numerosos rebrotes o rebrotes, los cuales presentan desafíos interesantes al momento de estimar su biomasa. El objetivo de este trabajo fue identificar especies vegetales, longitud de rotación y tipos de modelos usados para estimar biomasa en SRC, en revistas científicas de las bases de datos Scopus y Web of Science. Entre los modelos para estimar biomasa (y) de uso más frecuente destaca el alométrico, que tiene como variable predictora el diámetro normal (D) $f y X b_0 D^{b_1} A$, y $X b_0 \Gamma b_1 D \Gamma b_2 e^{D^2} \Gamma b_3 e^{H/D}$ diámetro basal del tallo (Liberloo *et al.*) $f y X b_0 D b^{b_1} A$ y la combinación del diámetro normal al cuadrado por la altura total ($D^2 H$) y $X b_0 \Gamma b_1 D^2 H$. Los géneros con mayor número de modelos diferentes fueron *Populus*, *Salix* y *Eucalyptus*, siendo los dos primeros los más estudiados. La longitud de rotación empleada en los cultivos estudiados varió de uno a 15 años.

Palabras clave. Cultivos leñosos, modelos alométricos, bioenergía, Scopus y Web of Science.

² Ríos J, E Acuña, J Cancino, R Rubilar, J Návar, R Rosales. 2016. Allometric equations commonly used for estimating shoot biomass in short-rotation wood energy species: a review. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22:193-202.

Introducción

La demanda mundial de energía crece de manera constante y esto propicia la escalada en el precio de los combustibles fósiles, los cuales representan el insumo más importante para la industria energética. Las fuentes de energía sostenible aportan en la actualidad el 19% del consumo energético mundial, y de esta cantidad el 50% es generado a partir de la combustión de biomasa vegetal (REN21 2013).

Numerosas especies leñosas cultivadas en rotaciones cortas (SRC) han adquirido importancia en la oferta de biomasa vegetal (Hoogwijk *et al.* 2005). Entre las especies dendroenergéticas más importantes a nivel mundial se encuentran eucalipto (*Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *E. denticulata*) (Camps y Marcos 2002), sauce (*Salix* spp.), álamo (*Populus* spp.) y acacia (*Acacia dealbata*, *A. melanoxylon*, *A. retinodes*). Estas especies presentan alta productividad y pueden promoverse como plantas forestales de rápido crecimiento (Hoogwijk *et al.* 2005).

La evidencia muestra que una importante vía para producir la biomasa, utilizada en la generación de energía, es a través del desarrollo de plantaciones de rápido crecimiento y rotaciones cortas. El interés en rodales de rebrotación radica principalmente en que éstos producen, en promedio, el doble del volumen de un rodal de regeneración sexual en los primeros ocho años (Sixto *et al.* 2008).

La estimación de la biomasa se realiza habitualmente mediante modelos alométricos basados en el diámetro normal (D) y la altura total del árbol (H) y en ocasiones también se utilizan algunas medidas de la forma de los árboles (Clutter *et al.* 1983). Se han desarrollado modelos alométricos para su uso en especies dendroenergéticas cultivadas en África (Henry *et al.* 2011), Europa (Muukkonen y Mäkipää 2006) y América del Sur (Návar 2009). Dichos modelos están basados en características de fácil medición en árboles uni-fustales, como son las variables diámetro normal y altura de la planta, las cuales junto con la densidad de la madera deben relacionarse con la producción de biomasa (Hauk *et al.* 2014).

Sin embargo, en los cultivos dendroenergéticos sólo la primera rotación está formada por individuos uni-fustales. A partir de la segunda rotación surgen numerosos rebrotes de cada cepa, lo cual presenta dificultades para la predicción del rendimiento de biomasa total en la parte aérea y sus componentes. Así surgió el interés por realizar una revisión bibliográfica con el objetivo de identificar especies, longitud de rotación y tipos de modelos alométricos usados para estimar biomasa en SRC. Para esto se realizó una recopilación bibliográfica de publicaciones científicas, relacionadas con el uso de especies, longitud de rotación y modelos alométricos para estimar biomasa aérea en SRC.

Metodología

Creación de la base de datos. Se realizó la búsqueda en línea de las revistas científicas incluidas en las bases de datos Scopus y Web of Science (WoS). La revisión incluyó todos los años de registros de las revistas indexadas en las dos bases de datos hasta abril de 2015. El criterio general de la búsqueda de publicaciones fue short rotation coppice (monte bajo de corta rotación) y se incluyeron los siguientes cinco conceptos: short rotation coppice (SRC), short rotation forestry (SRF), short rotation woody crops (SRWC), short rotation intensive culture (SRIC) y bioenergy crops (BC). Esos conceptos se combinaron con las siguientes cinco palabras clave: allometry, allometric, model, equation y partition, con el fin de incrementar el nivel de especificidad en cada uno de los cinco conceptos relacionados con el criterio de monte bajo de corta rotación.

Recopilación y análisis de publicaciones. El número total de publicaciones encontradas para todas las posibles combinaciones de los conceptos y palabras claves fueron revisadas, excluyendo aquellas publicaciones que, a pesar de coincidir con los criterios de búsqueda, carecieron de modelos matemáticos para la estimación de biomasa.

Los documentos obtenidos se exportaron al software “EndNote X6”, con el fin de unir las dos bases de datos y eliminar los duplicados de manera automática. La base de datos final incluyó únicamente las publicaciones en las que la alometría estaba relacionada con modelos alométricos para la estimación de biomasa producida por los rebrotes en sistemas de monte bajo de corta rotación.

Resultados y Discusión

Mediante el uso del criterio, conceptos y palabras clave, simples y compuestas, definidos para el estudio, se recopilaron 1,382 artículos publicados entre 1996 y 2015. La mayor parte de las publicaciones provinieron de la base de datos Scopus. El concepto de uso más frecuente fue bioenergy crops, que permitió la identificación de 492 publicaciones (36% del total), de las cuales 362 se obtuvieron de la base de datos Scopus y 130 de WoS. Otro concepto importante fue short rotation coppice, que registró 420 publicaciones (30% del total) y de éstas 282 se obtuvieron de Scopus y 138 en WoS. Los conceptos que presentaron menor frecuencia fueron short rotation forestry (260 publicaciones), short rotation woody crops (140), short rotation intensive culture (42) y short rotation crops (28) (Tabla 11). La combinación de la palabra clave (Model) con todos los conceptos mostró mayor registro de publicaciones en ambas bases de datos (1,072 artículos), pero sin presencia de ecuaciones alométricas para estimar biomasa (Tabla 11). Luego de la depuración de artículos, con base en duplicaciones y tipo de contenido, se seleccionaron únicamente 65 publicaciones que mostraron la alometría de forma dirigida a la estimación de biomasa, de éstas 52 (82%) estuvieron asociadas al concepto SRC y 13 (20%) a BC.

Tabla 10. Número de publicaciones relacionadas a la estimación de biomasa en rebrotes, recopiladas según concepto, palabra clave y base de datos consultada.

| Palabra clave | Conceptos | | | | | | | | | | | |
|---------------|-----------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| | SRC | | SRF | | SRWC | | SRCR | | SRIC | | BC | |
| | Scopus | WoS | Scopus | WoS | Scopus | WoS | Scopus | WoS | Scopus | WoS | Scopus | WoS |
| Allometry | 20 | 4 | 10 | 7 | 7 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 |
| Allometric | 22 | 11 | 17 | 12 | 7 | 5 | 2 | 1 | 2 | 0 | 4 | 1 |
| Model | 208 | 98 | 106 | 52 | 74 | 26 | 18 | 11 | 19 | 11 | 328 | 121 |
| Equation | 31 | 17 | 32 | 16 | 14 | 2 | 1 | 0 | 5 | 2 | 20 | 3 |
| Partition | 1 | 8 | 1 | 5 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 5 |

SRC: short rotation coppice; SRF: short rotation forestry; SRWC: short rotation woody crops; SRCR: short rotation crops; SRIC: short rotation intensive culture; BC: bioenergy crops; WoS: Web of Science. Fuente: Elaboración propia.

Las 65 publicaciones identificadas fueron examinadas en forma detallada, para seleccionar únicamente aquellos artículos que mostraron de forma explícita modelos y variables para predecir la biomasa de rebrotes en cultivos de corta rotación. Mediante ese análisis se detectaron únicamente 25 publicaciones y de éstas, una alta cantidad 12 (48%) se relacionaron con plantaciones de híbridos del género *Populus* que fueron establecidas en países como Alemania, Italia, Bélgica, República Checa, Dinamarca y Francia. El resto de las publicaciones se generaron en plantaciones de otros géneros vegetales, como *Salix* (4 artículos), establecidas en Suecia, Dinamarca y Croacia y *Eucalyptus* (2 artículos) en Madagascar y Francia. También se obtuvieron publicaciones individuales en cultivos mixtos de los géneros *Populus-Salix* (República Checa), *Liquidambar-Platanus* (Georgia), *Acer-Populus* (Bélgica), *Alnus-Betula* (Estonia), *Daniellia* (Benín), *Platanus* (EUA) y *Robina* en Alemania.

El género *Populus* fue el más frecuente en los estudios que generaron modelos alométricos para estimar biomasa aérea en rebrotes (Tabla 12). Otros géneros vegetales importantes en desarrollo de modelos en SRC fueron *Salix* y *Eucalyptus*. Las investigaciones se realizaron con diferentes clones, híbridos inter-específicos y longitud de rotación desde uno hasta 15 años.

La longitud de rotación empleada en los cultivos estudiados es muy variable, en siete estudios realizados con diferentes géneros vegetales se estimó la biomasa a una sola rotación como fue el caso de *Acer*, *Alnus*, *Betula*, *Daniellia*, *Liquidambar* y dos en *Platanus*. La mayoría de estos fueron evaluados a los ocho años, a excepción de *Acer* (4 años) y *Daniellia* (3 años). Sin embargo, el género *Eucalyptus*, reportado en dos estudios, mostró mayor variabilidad de evaluación en el transcurso del tiempo (1, 2, 3, 5, 6, 10, 13, 14 y 15 años). Le siguieron los géneros *Robina* (2, 3, 4 y 14 años), *Populus* (3, 4 y 8 años) y *Salix* (1, 2, 4 y 6 años) (Figura 10).

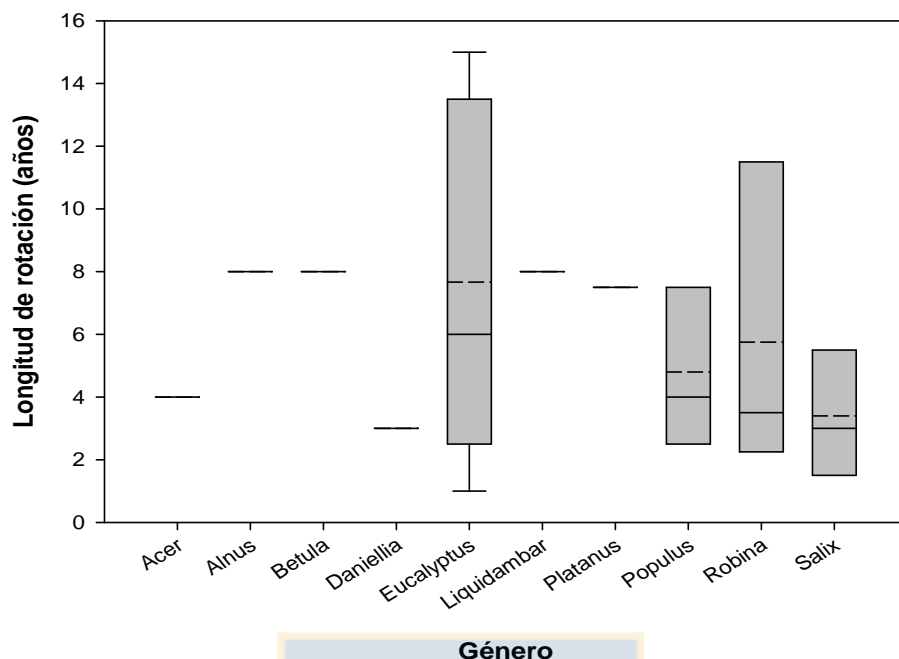


Figura 10. Longitud de rotación por género registrada en cada estudio. La línea segmentada representa la edad promedio, la línea continua la mediana, los extremos de las columnas, los cuartiles del 25 y 75%, y las barras de error, la desviación estándar. Fuente: Elaboración propia.

Se identificó la aplicación de diferentes modelos para estimar la biomasa en especies arbóreas a partir de cultivos de corta rotación (Tabla 12), establecidos principalmente en los continentes de Europa, África y Norte de América, dentro de los que sobresale el modelo típico alométrico y Xb_0D^h , probado en la mayoría de las especies estudiadas, con excepción de *Eucalyptus*, *Alnus*, *Betula* y *Liquidambar*. Este modelo fue utilizado por Laureysens *et al.* (2004), Liberloo *et al.* (2005), Liberloo *et al.* (2006), Rock (2007a), Röhle *et al.* (2006a), Vande Walle *et al.* (2007), Al Afas *et al.* (2008), Fajman *et al.* (2009), Fischer *et al.* (2011), Sevel *et al.* (2012) y Mugasha *et al.* (2013), donde algunos investigadores midieron cada rebrote como un tallo único. Otros investigadores realizaron podas en la cepa o tocón, dejando uno o dos rebrotes, midiendo el diámetro del tallo (D) a diferentes alturas según la especie estudiada, con el propósito de encontrar el mejor ajuste del modelo y con ello incrementar el nivel de correlación y precisión de las estimaciones, lo cual mostró coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.85.

Tabla 11. Modelos alométricos utilizados en la estimación de biomasa en SRC, género, longitud de rotación, país y fuente, encontrados en la revisión bibliográfica.

| Modelo | Género | Longitud de rotación/años | País | Fuente |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------------|
| | <i>Acer, Salix, Populus</i> | 4 | Bélgica | (Vande Walle <i>et al.</i> 2007) |
| | <i>Populus</i> | 4 | Bélgica | (Laureysens <i>et al.</i> 2004) |
| | <i>Populus</i> | 3 | Italia | (Liberloo <i>et al.</i> 2005) |
| | <i>Populus</i> | 3 | Italia | (Liberloo <i>et al.</i> 2006) |
| | <i>Populus</i> | 2 | Italia | (Guidi <i>et al.</i> 2008a) |
| $y \times b_0 D^{b_1}$ | <i>Populus</i> | 2 y 3 | Bélgica | (Al Afas <i>et al.</i> 2008) |
| | <i>Populus</i> | 8 | Alemania | (Rock 2007b) |
| | <i>Populus</i> | 8 | Tanzania | (Mugasha <i>et al.</i> 2013) |
| | <i>Populus</i> | 8 | República Checa | (Fischer <i>et al.</i> 2011) |
| | <i>Populus-Salix</i> | 7 | República Checa | (Fajman <i>et al.</i> 2009) |
| | <i>Salix</i> | 2 y 3 | Dinamarca | (Sevel <i>et al.</i> 2012) |
| | <i>Alnus, Betula</i> | 8 | Estonia | (Uri <i>et al.</i> 2010) |
| $y \times b_0 \Gamma b_1 D^2 H$ | <i>Liquidambar-Platanus</i> | 8 | Georgia | (Allen <i>et al.</i> 2005) |
| | <i>Populus</i> | 3 | Bélgica-Francia | (Herve y Ceulemans 1996) |
| $y \times b_0 \Gamma b_1 D^{b_2}$ | <i>Salix</i> | 2 | Suecia | (Telenius 1999) |
| | <i>Salix</i> | 2 | Croacia | (Bogdan <i>et al.</i> 2006) |
| $y \times b_0 D^{b_1}$ | | | | |
| $y \times b_0 \Gamma b_1 D^2 H$ | <i>Daniellia</i> | 3 | Benín | (Avohou <i>et al.</i> 2011) |
| $\ln y_{agb} \times b_0 \Gamma b_1 \ln f D b_i A$ | | | | |
| $\ln y_{bgb} \times b_0 \Gamma b_1 \ln f C i_r A$ | <i>Eucalyptus</i> | 3 y 5 | Madagascar | (Razakamanarivo <i>et al.</i> 2012a) |
| $y \times b_0 \Gamma f b_1 \Gamma b_2 T A D^{b_3}$ | | | | |
| $y \times b_0 \Gamma b_1 D \Gamma b_2 T$ | | | | |
| $y \times b_0 D^{b_1} \Gamma b_2 \ln f T A$ | | | | |
| $y \times \frac{b_0 \Gamma b_1 D \cdot 100}{b_2 \Gamma D \cdot 100} \Gamma D \cdot T$ | <i>Eucalyptus</i> | 1, 2, 3, 5, 6, 10, 13, 14 y 15 | Francia | (Bouvet <i>et al.</i> 2013) |
| $y \times b_0 \Gamma D^{b_1} \Gamma b_2 \ln f T A$ | | | | |
| $y \times b_0 D b^{b_1}$ | <i>Platanus</i> | 7 | Estados Unidos | (Davis y Trettin 2006) |
| $y \times b_0 \Gamma b_1 D \Gamma b_2 D^2$ | | | | |
| $y \times b_0 D^{b_1}$ | | | | |
| $y \times b_0 e^{b_1 D}$ | | | | |
| $y \times b_0 \Gamma b_1 D \Gamma b_2 e^{D^2} \Gamma b_3 e^{H/D}$ | <i>Populus</i> | 4 | Alemania | (Röhle <i>et al.</i> 2006b) |
| $y \times b_0 \Gamma b_1 D H$ | | | | |
| $y \times b_0 \Gamma b_1 D_m^{b_2} \Gamma b_3 D^2 H_m$ | | | | |
| $y \times b_0 D^{b_1} H^{b_2}$ | | | | |
| $\ln y \times \ln f b_0 A \Gamma b_1 \ln f D A$ | <i>Populus</i> | 3 | Alemania | (Morhart <i>et al.</i> 2013) |

$$\hat{y}_{fex} = \hat{b}_0 D^{\hat{h}} FC$$

$$FC = X e^{(0.5 |^2)}$$

| | | | | |
|-----------------------------------------------------|----------------|--------------|----------|-----------------------------|
| $y = X b_0 \Gamma b_1 D^{b_2}$ | | | | |
| $y = X b_0 \Gamma b_1 D^{b_2} H^{b_3}$ | <i>Populus</i> | 8 | Francia | (Brahim <i>et al.</i> 2000) |
| $y = X b_0 \Gamma b_1 D \Gamma b_2 D^2 H_m$ | | | | |
| $y = X b_0 \Gamma b_1 D_m^{b_2} \Gamma b_3 D^2 H_m$ | | | | |
| $\ln y = X \ln f b_0 A \Gamma b_1 \ln f D^A$ | <i>Robina</i> | 2, 3, 4 y 14 | Alemania | (Böhm <i>et al.</i> 2011) |
| $y = X b_0 \Gamma b_1 D^{b_2}$ | | | | |
| $y = X f b_0 \Gamma b_1 T \Gamma b_2 T^2 A D^{b_3}$ | <i>Salix</i> | 1, 2 y 10 | Suecia | (Verwijst y Telenius 1999) |

y : biomasa total; D : diámetro normal; H : altura; T : tiempo; Db_i : Diámetro basal de todos los rebrotes (rebrotos); \ln : logaritmo natural; Cir_i : circunferencia de la cepa; agb : biomasa por encima del suelo (parte aérea); bgb : biomasa por debajo del suelo (raíz); b_0, b_1, b_2, b_3 : parámetros del modelo; FC : factor de corrección; H_m : altura media; D_m : diámetro medio. Fuente: Elaboración propia.

En sauce (*Salix*), se compararon los valores de biomasa obtenidos con el método destructivo y aquellos estimados con ecuaciones alométricas (no destructivo). Se concluyó que el modelo alométrico $y = X b_0 D^{b_1}$ fue eficiente y puede utilizarse en plantaciones comerciales de sauce para la estimación de biomasa aérea en rebrotes.

Con base en los resultados, la altura con mayor coeficiente de determinación se obtuvo al medir el diámetro del tallo a los 105 cm (R^2 -adj = 0.99), aunque a la altura de 85 y 55 cm, ambos con R^2 -adj = 0.97, también mostraron valores aceptables de predicción, pudiendo ser utilizados cuando el cultivo está en su etapa inicial de crecimiento y no se haya alcanzado el metro de altura. En *Populus*, Guidi *et al.* (2008b) validaron el modelo alométrico para estimar la producción de biomasa leñosa y cantidad de corteza en el tallo, con base en su diámetro normal 1.30 m (D), estimando de manera eficiente la cantidad de biomasa total con corteza y sin corteza, como la mejor relación entre el diámetro del tallo y la biomasa del árbol.

El modelo típico alométrico $y = X b_0 x^{b_1}$ se ha modificado con base en los resultados de diferentes estudios encaminados a determinar la biomasa con relaciones alométricas a diferentes diámetros (D), diámetro basal (Liberloo *et al.*) y altura total (H), utilizadas como variables predictoras (x)

del modelo de regresión. Por ejemplo, Böhm *et al.* (2011), en plantaciones de *Robinia pseudoacacia*, desarrollaron ecuaciones alométricas, para predecir biomasa, basadas en el diámetro basal y altura total (DbH). Dichas ecuaciones se consideraron suficientemente precisas para estimar la biomasa leñosa de la parte aérea en esta especie.

Otras de las variables predictoras frecuentemente utilizadas en los modelos para estimar biomasa en rebrotes de las especies de estudio son el logaritmo natural del diámetro normal ($\ln D$), diámetro al cuadrado por la altura (D^2H) y diámetro sobre altura (D/H), que varían entre tres y cuatro parámetros de regresión.

Por otra parte Verwijst y Telenius (1999) ajustaron el modelo alométrico en cinco fechas diferentes durante la primera estación de crecimiento en *Salix*. Después, fijaron el intercepto del modelo y determinaron la evolución de la pendiente (b_1, b_2) en el transcurso del tiempo T . De los ajustes resultó el modelo $y = X \left[b_0 + \Gamma b_1 T + \Gamma b_2 T^2 \right] D^{b_3}$. Donde T se expresa en términos relativos y varía entre 0 y 1 y D es el diámetro normal. Con este modelo se obtiene un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.99$ (Tabla 12).

El modelo alométrico linealizado fue otro de los modelos estudiados en SRC, Morhart *et al.* (2013) evaluaron en *Populus maximowiczii* \times *P. trichocarpa* (híbrido 275), el modelo logarítmico o linealizado $\ln y = X \ln \left[b_0 + \Gamma b_1 \ln D + \Gamma b_2 \ln^2 D \right]$, pero de acuerdo con Finney (1941) al momento de linealizar se obtiene la media geométrica de la muestra original, lo cual tiende a subestimar la media aritmética de la población. Por lo tanto, para corregir el sesgo introducido en el modelo, utilizaron el factor de corrección multiplicativo $FC = X e^{0.5 \ln^2 X}$. Después aplicando el factor (FC), usaron el modelo $\hat{y}_{fc} = X \hat{b}_0 D^{\hat{b}_1} \cdot FC$, para regresar a su escala original de medición.

Los coeficientes de determinación ajustados en la estimación (R^2 -adj) fueron de 0.99 para la producción de biomasa aérea en tallos y hojas, mientras que para ramas se obtuvo un valor de 0.98. Los investigadores concluyeron que el uso del modelo propuesto, el cual usa el diámetro normal (D) como variable predictiva, es eficiente y sencillo para estimar la biomasa aérea.

Razakamanarivo *et al.* (2012b) también evaluaron el modelo linealizado para estimar biomasa aérea y radical en *Eucalyptus robusta*, pero con diferente variable predictora $\ln y_{agb} = Xb_0 + \Gamma b_1 \ln fDb_i + A$, donde (y_{agb}) es la biomasa sobre el suelo y (Db_i) es diámetro basal del tallo. Para la biomasa en raíz sustituyeron dentro del modelo la variable dependiente (y_{bgb}) biomasa subterránea y circunferencia de la cepa (Blanco *et al.*) como variable predictora. Para la corrección de sesgo de la transformación logarítmica, aplicaron el factor de corrección propuesto por (Finney 1941) (Tabla 12). Razakamanarivo *et al.* (2012b) concluyeron que el modelo evaluado puede utilizarse para estimar la biomasa aérea y subterránea en *E. robusta*, mediante el uso del diámetro basal y la circunferencia de la cepa, respectivamente.

Brahim *et al.* (2000) probaron cuatro ecuaciones de regresión alométrica generalizadas para estimar la biomasa aérea en árboles individuales de *Populus*. Se observó que la sumas de cuadrados residuales no fueron significativamente diferentes al hacer el análisis a nivel de sitio, con un valor para el coeficiente de determinación R^2 superior a 0.94. Los cuatro modelos resultaron aceptables para adaptarse a la estimación de la biomasa a nivel de sitio, aunque se estableció que los tres primeros modelos tienden a sobreestimar valores al hacer el análisis con todos los sitios. Únicamente el modelo $y = Xb_0 + \Gamma b_1 D_m^{b_2} + \Gamma b_3 D^2 H_m$ mostró significancia, con un R^2 de 0.98, en la estimación de biomasa en la combinación de todos los sitios, utilizando como variables predictoras el diámetro medio (Morales *et al.*) y diámetro al cuadrado por la altura total media ($D^2 H_m$) (Tabla 12). Los resultados mostraron que la regresión generalizada con cuatro parámetros fue suficiente para estimar de manera precisa la biomasa aérea de árboles cultivados en todos los sitios.

Conclusiones

En la recopilación y análisis descriptivo de artículos científicos relacionados con modelos para la estimación de biomasa en rebrotes de plantaciones dendroenergéticas, se pudieron identificar las principales especies vegetales, rotaciones, métodos y técnicas utilizadas en la estimación de biomasa en el sistema SRC. En dichos artículos se utilizó con mayor frecuencia los géneros *Populus*, *Salix* y *Eucalyptus*. En la mayoría de los conjuntos de datos en este análisis destacó el modelo exponencial,

con diferentes variables predictoras, entre las cuales el diámetro normal (D), altura total (H) y el diámetro basal (Liberloo *et al.*) resultaron preponderantes. La longitud de rotación fue muy variable de uno a 15 años, atribuido principalmente a la zona geográfica y calidad de sitio donde los cultivos fueron establecidos.



Referencias

- Al Afas NA, N Marron, S Van Dongen, I Laureysens, R Ceulemans. 2008. Dynamics of biomass production in a poplar coppice culture over three rotations (11 years). *Forest Ecology and Management* 255:1883-1891.
- Allen CB, RE Will, MA Jacobson. 2005. Production efficiency and radiation use efficiency of four tree species receiving irrigation and fertilization. *Forest Science* 51:556-569.
- Avohou TH, R Houehounha, R Glele-Kakai, AE Assogbadjo, B Sinsin. 2011. Firewood yield and profitability of a traditional *Daniellia oliveri* short-rotation coppice on fallow lands in Benin. *Biomass & Bioenergy* 35:562-571.
- Blanco S, M Hernández, P Ciria, J Carrasco, I Canellas. 2010. Manual de cultivo de *Populus* spp. para la producción de biomasa con fines energéticos. Madrid. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria Ministerio de Ciencia e Innovación. 57 p.
- Bogdan S, D Kajba, I Katić. 2006. Biomass production in willow clonal tests on marginal sites in Croatia. *Produkcija biomase u klonskim testovima stablastih vrba na marginalnim staništima u hrvatskoj*:261-275.
- Böhm C, A Quinkenstein, D Freese. 2011. Yield prediction of young black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) plantations for woody biomass production using allometric relations. *Annals of Forest Research* 54:215-227.
- Bouvet A, N Nguyen-The, F Melun. 2013. Nutrient concentration and allometric models for hybrid eucalyptus planted in France. *Annals of Forest Science* 70:251-260.
- Brahim MB, A Gavaland, A Cabanettes. 2000. Generalized allometric regression to estimate biomass of *Populus* in short-rotation coppice. *Scandinavian Journal of Forest Research* 15:171-176.
- Camps M, F Marcos. 2002. Los biocombustibles. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa. 366 p.
- Clutter JL, JC Fortson, LV Pienaar, GH Brister, RL Bailey. 1983. Timber management: a quantitative approach. John Wiley & Sons, Inc.
- Davis AA, CC Trettin. 2006. Sycamore and sweetgum plantation productivity on former agricultural land in South Carolina. *Biomass and Bioenergy* 30:769-777.

- Fajman M, M Palát, P Sedlák. 2009. Estimation of the yield of poplars in plantations of fast-growing species within current results. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 57:25-36.
- Finney D. 1941. On the distribution of a variate whose logarithm is normally distributed. *Supplement to the Journal of the Royal Statistical Society*:155-161.
- Fischer M, M Trnka, J Ku era, M Fajman, Z Žalud. 2011. Biomass productivity and water use relation in short rotation poplar coppice (*Populus nigra* × *P. maximowiczii*) in the conditions of Czech Moravian Highlands. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 59:141-152.
- Guidi W, E Piccioni, M Ginanni, E Bonari. 2008a. Bark content estimation in poplar (*Populus deltoides* L.) short-rotation coppice in Central Italy. *Biomass and Bioenergy* 32:518-524.
- Guidi W, E Piccioni, M Ginanni, E Bonari. 2008b. Bark content estimation in poplar (*Populus deltoides* L.) short-rotation coppice in Central Italy. *Biomass & Bioenergy* 32:518-524.
- Hauk S, T Knoke, S Wittkopf. 2014. Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29:435-448.
- Henry M, N Picard, C Trotta, RJ Manlay, R Valentini, M Bernoux, L Saint-André. 2011. Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: A review of available allometric equations. *Silva Fennica* 45:477-569.
- Herve C, R Ceulemans. 1996. Short-rotation coppiced vs non-coppiced poplar: A comparative study at two different field sites. *Biomass and Bioenergy* 11:139-150.
- Hoogwijk M, A Faaij, B Eickhout, B de Vries, W Turkenburg. 2005. Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRES land-use scenarios. *Biomass and Bioenergy* 29:225-257.
- Laureysens I, J Bogaert, R Blust, R Ceulemans. 2004. Biomass production of 17 poplar clones in a short-rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics. *Forest Ecology and Management* 187:295-309.
- Liberloo M, C Calfapietra, M Lukac, D Godbold, ZB Luo, A Polle, MR Hoosbeck, O Kull, M Marek, C Raines, M Rubino, G Taylor, G Scarascia-Mugnozza, R Ceulemans. 2006. Woody biomass production during the second rotation of a bio-energy *Populus* plantation increases in a future high CO₂ world. *Global Change Biology* 12:1094-1106.

- Liberloo M, SY Dillen, C Calfapietra, S Marinari, BL Zhi, P De Angelis, R Ceulemans. 2005. Elevated CO₂ concentration, fertilization and their interaction: Growth stimulation in a short-rotation poplar coppice (EUROFACE). *Tree Physiology* 25:179-189.
- Morales SL, E Acevedo, G Castellaro, L Román-Osorio, J Morales-Inostroza, F Alonso. 2015. A simple method for estimating suitable territory for bioenergy species in Chile. *Ciencia e investigación agraria: revista latinoamericana de ciencias de la agricultura* 42:227-242.
- Morhart C, J Sheppard, H Spiecker. 2013. Above Ground Leafless Woody Biomass and Nutrient Content within Different Compartments of a *P. maximowicii* x *P. trichocarpa* Poplar Clone. *Forests* 4:471-487.
- Mugasha WA, T Eid, OM Bollandasås, RE Malimbwi, SAO Chamshama, E Zahabu, JZ Katani. 2013. Allometric models for prediction of above-and belowground biomass of trees in the miombo woodlands of Tanzania. *Forest Ecology and Management* 310:87-101.
- Muukkonen P, R Mäkipää. 2006. Erratum: Biomass equations for European trees: Addendum (Silva Fennica (2005) 4 (63)). *Silva Fennica* 40:763-773.
- Návar J. 2009. Biomass component equations for Latin American species and groups of species. *Annals of Forest Science* 66:208-208.
- Razakamanarivo RH, A Razakavololona, MA Razafindrakoto, G Vieilledent, A Albrecht. 2012a. Below-ground biomass production and allometric relationships of eucalyptus coppice plantation in the central highlands of Madagascar. *Biomass and Bioenergy* 45:1-10.
- Razakamanarivo RH, A Razakavololona, MA Razafindrakoto, G Vieilledent, A Albrecht. 2012b. Below-ground biomass production and allometric relationships of eucalyptus coppice plantation in the central highlands of Madagascar. *Biomass & Bioenergy* 45:1-10.
- REN21. 2013. Renewables 2013 Global Status Report. Paris, Francia. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). 178 p.
- Rock J. 2007a. Suitability of published biomass equations for aspen in Central Europe - Results from a case study. *Biomass & Bioenergy* 31:299-307.
- Rock J. 2007b. Suitability of published biomass equations for aspen in Central Europe - Results from a case study. *Biomass and Bioenergy* 31:299-307.

- Röhle H, KU Hartmann, D Gerold, C Steinke, J Schröder. 2006a. Biomass functions for short rotation forestry. *Aufstellung von Biomassefunktionen für Kurzumtriebsbestände* 177:178-187.
- Röhle H, KU Hartmann, D Gerold, C Steinke, J Schröder. 2006b. Biomass functions for short rotation forestry. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 177:178-187.
- Sevel L, T Nord-Larsen, K Raulund-Rasmussen. 2012. Biomass production of four willow clones grown as short rotation coppice on two soil types in Denmark. *Biomass and Bioenergy* 46:664-672.
- Sixto H, M Hernández, M Barrio, J Carrasco, I Cañellas. 2008. Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión. *Forest Systems* 16:277-294.
- Telenius BF. 1999. Stand growth of deciduous pioneer tree species on fertile agricultural land in southern Sweden. *Biomass and Bioenergy* 16:13-23.
- Uri V, J Aosaar, M Varik, M Kund. 2010. The growth and production of some fast growing deciduous tree species stands on abandoned agricultural land. *Forestry Studies* 52:18-29.
- Vande Walle I, N Van Camp, L Van de Castele, K Verheyen, R Lemeur. 2007. Short-rotation forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) I-Biomass production after 4 years of tree growth. *Biomass and Bioenergy* 31:267-275.
- Verwijst T, B Telenius. 1999. Biomass estimation procedures in short rotation forestry. *Forest Ecology and Management* 121:137-146.

VII. Dinámica de brotación y densidad básica de la madera en rebrotes de tres especies dendroenergéticas³

Resumen

La dinámica de brotación y la densidad básica son características importantes en el manejo de especies para producción de biomasa con fines energéticos. El objetivo fue estudiar la dinámica de brotación y la densidad básica en *Eucalyptus globulus* Labill, *Eucalyptus denticulata* Cook & Ladiges y *Acacia dealbata* Link con tres densidades de plantación 5,000, 10,000 y 15,000 árboles ha⁻¹. A los 10 meses *A. dealbata* presentó el número mayor de rebrotes proventicios (5 a 19) en las tres densidades y posteriormente el número se redujo (4 a 7), a los 21 y 31 meses DC en 10,000 y 15,000 árboles ha⁻¹. *E. denticulata* y *E. globulus* mostraron de tres a ocho rebrotes proventicios y entre uno y cuatro a los 31 meses DC. En 2014, los rebrotes de *E. denticulata* presentaron mayor densidad básica (520 y 570 kg m⁻³). Los rebrotes de *A. dealbata* y *E. globulus* mostraron densidades entre 440 y 500 kg m⁻³, La densidad básica se redujo en 2015 y *E. denticulata* conservó la superioridad con 470 y 490 kg m⁻³. En cepas de dos años se registró nivel alto de brotación. En las tres especies, el número de rebrotes proventicios se redujo con el tiempo favoreciendo la poda natural. La densidad básica de la madera mostró valores similares a plantaciones adultas, beneficiando la producción de biomasa para energía a partir de rebrotes como cultivos dendroenergéticos de corta rotación.

Palabras clave: Cultivos leñosos, monte bajo, densidad básica.

³ Rios J, E Acuña, J Cancino, R Rubilar, J Corral, R Rosales. 2017. Dynamics of sprouting and basic density of wood in shoots of three wood species with dendroenergy potential. *Agrociencia* 51:215-227.

Introducción

Las especies leñosas cultivadas a través de un sistema silvícola de monte bajo de ciclos cortos (Short Rotation Coppice “SRC”) han adquirido importancia en la oferta de biomasa vegetal (Hoogwijk *et al.* 2005), la cual puede utilizarse con fines dendroenergéticos. *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, *Eucalyptus denticulata* (Camps y Marcos 2002) y *Acacia dealbata* (Quiroz *et al.* 2014) se encuentran entre las especies vegetales con potencial dendroenergético de mayor importancia a nivel mundial. También se ha incrementado el interés por el manejo de los rodales a través de métodos de monte bajo, debido a que se estima que éstos producen el doble del volumen en comparación con un rodal de regeneración sexual o monte alto, en los primeros ocho años (Sixto *et al.* 2008).

En varias especies de plantas después de un aprovechamiento, en sus cepas surge una cantidad considerable de rebrotes, resultando provechoso para obtener mayor biomasa por unidad de superficie y en cortos periodos de cosecha. Se ha demostrado que algunas especies de sauces, álamos, acacias y eucaliptos son las más adecuadas para su manejo en monte bajo, especialmente porque muestran capacidad alta de brotación o retoños con el vigor suficiente para obtener biomasa con fines dendroenergéticos (Geldres *et al.* 2006). También se dice que, los rebrotes de origen proventicio son los que mejor se desarrollan, sobreviven y produciendo mejor calidad de biomasa, superando entre el 10% y el 20% a los rebrotes adventicios (Vita *et al.* 1997).

Unas de las propiedades más importantes de la madera es la densidad básica, ya que presenta estrecha relación con el comportamiento físico-mecánico de este material (Omonte y Valenzuela 2011, Pereyra y Gelid 2002). Asimismo, dicha característica es uno de los principales indicadores de la calidad y el rendimiento en especies forestales y es considerada como un atributo de la madera que depende del tipo de árbol, de la edad, del sitio y de los tratamientos silvícolas que se utilizan durante el ciclo (Arango *et al.* 2001).

En las especies forestales se ha observado incremento en la producción de biomasa en rodales con densidades altas de población, detectándose que la mortalidad natural (auto-aclareo), es lo que regula el número de individuos (Mátyás y Varga 2000). En eucalipto y acacia se tiene

información limitada para evaluar el efecto de la densidad de plantación sobre el ajuste natural del número y densidad básica de los rebrotes a lo largo del ciclo (Miranda y Pereira 2015, Petro *et al.* 2015). El objetivo de este estudio fue evaluar la dinámica del número y la densidad básica en rebrotes de *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus denticulata* y *Acacia dealbata* en diferentes densidades de plantación. La hipótesis del trabajo fue que todas las especies evaluadas mostrarían igualdad estadística para la dinámica de brotación y densidad básica en las tres densidades de plantación.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el predio La Aguada, perteneciente a la comuna de Yumbel. Antecedentes generales del sitio y del diseño del ensayo se detallan en el capítulo II.

Variables evaluadas. A los diez meses después del corte, se evaluó la dinámica del número de rebrotes proventicios por tocón, contando el número de ellos en la unidad experimental en dos periodos (septiembre 2014 y septiembre 2015), también se midió la altura y el diámetro a la altura del cuello de cada rebrote. Para el análisis combinado de rebrotes, se contó en cada tocón el tipo de rebrote (proventicio y adventicio) a los 10, 21 y 31 meses de crecimiento. El tipo de rebrote se definió según sus características fisiológicas y posición; aquellos que brotaron en la corona del tocón y en posición horizontal formados de las yemas de cicatrización fueron identificados como adventicios, en tanto que aquellos mejor unidos al tocón (planta madre) y en posición vertical originarios de yemas latentes dentro de los tejidos vivos del tocón fueron identificados como proventicios (de Simon y Bocio 1999). Además, en dos periodos de medición (2014 y 2015) se evaluó la densidad básica de cada rebrote o rebrote, mediante la extracción de muestras (rodajas) a diferentes alturas a lo largo del fuste. Para esto, se seleccionaron tres cepas en el área de amortiguamiento de cada parcela y en cada una de ellas se cortaron todos los rebrotes, los cuales fueron empaquetados y etiquetados para identificar el bloque, especie, densidad, tocón y tipo de rebrote (adventicio y proventicio). Posteriormente, los rebrotes fueron trasladados al laboratorio para su estudio.

La determinación de la densidad básica de la madera se inició con la medición de todos los rebrotes de cada uno de las cepas. En cada rebrote se evaluó la altura total con un telescopio marca Messfixs® de 12 m y el diámetro por sección con un pie de metro marca Mitutoyo® a los 10, 50, 130 cm (diámetro normal = DAP) y luego a cada metro, hasta que se registraron diámetros inferiores a 10 mm. En cada uno de estos puntos marcados a lo largo del fuste se obtuvieron rodajas (de 2.5 cm de espesor) y fueron ordenadas y etiquetadas en mallas plásticas, después se colocaron en recipientes con agua, hasta su completa sumersión, para de esa forma lograr que el volumen de las rodajas sobrepasara el punto de saturación de las fibras, cuando las rodajas estuvieron completamente saturadas (peso constante), se determinó su volumen por el método de desplazamiento de agua, midiendo el agua desplazada por cada muestra (cm^3 de agua = g) según la Norma NCh 176/2 (INN 1986). En la medición del peso del agua desplazada se utilizó una balanza electrónica Snowrex® (precisión 0,01 g) y sobre ésta se colocó un recipiente con agua, apropiado para que las muestras cupiera, sin tocar los costados ni el fondo y que, al mismo tiempo, estuvieran completamente sumergidas. De esta forma se obtuvo el peso del agua desplazada, mismo que corresponde al volumen de la muestra de madera, al considerar la densidad del agua como la unidad (Valencia y Vargas 1997).

Después de evaluar el volumen desplazado de agua, las muestras se pusieron en bolsas de papel rotuladas y se colocaron en el horno (Riossa®) a una temperatura de 105 °C, para su secado hasta peso constante. El peso seco (anhidro) se obtuvo, en una balanza electrónica (precisión 0.01 g), inmediatamente después de la extracción de las muestras del horno para evitar la absorción de humedad ambiental y la alteración del peso seco. La densidad básica de la madera correspondió al cociente entre el peso seco (anhidro) y el volumen saturado de cada muestra de la madera, lo cual se obtuvo con la ecuación (1) y para la obtención de la densidad básica ponderada se utilizó la ecuación (2):

$$Db \times \frac{PS}{Vh} \quad (1)$$

Donde Db = densidad básica (g cm^{-3}), PS = peso seco (g) y Vh = volumen saturado (cm^3).

$$\bar{u}_i X(u_b A_b \Gamma u_s A_s) / (A_b \Gamma A_s) \quad (2)$$

Donde \bar{u} = densidad básica ponderada, u_b = densidad básica de la sección basal, u_s = densidad básica de la sección superior, A_b = área de la sección basal, A_s = área de la sección superior.

Análisis de datos. Los datos obtenidos en campo y laboratorio se analizaron mediante el uso de estadística descriptiva e inferencial, mediante la representación gráfica y de tablas de los resultados encontrados, con base en la especie, densidad y fecha de evaluación y se realizó un análisis de varianza (ANOVA), y la comparación de medias se obtuvo mediante la prueba significativa honesta de Tukey (P = 0.05). El modelo estadístico utilizado fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} \sim \Gamma SP_i \Gamma A_j \Gamma D_k \Gamma Tr_l \Gamma SP f A_{ij} \Gamma SP f D_{ik} \Gamma SP f Tr_{il} \Gamma E_{ijkl}$$

$i \in \{1, \dots, 3\}; j \in \{1, \dots, 2\}; k \in \{1, \dots, 3\}; l \in \{1, \dots, 2\}$

donde: Y_{ijkl} = valor de la variable dependiente, observado, en la especie i , en el año de evaluación j , en la densidad de plantación k y tipo de rebrote l ; μ = es la media general; SP_i = efecto de la i -ésima especie; A_j = efecto del j -ésimo año; D_k = efecto de la k -ésima densidad de plantación; Tr_l = efecto del l -ésimo tipo de rebrote; $SP f A_{ij}$ = efecto de la interacción entre la i -ésima especie y j -ésimo año; $SP f D_{ik}$ = efecto de la interacción entre la i -ésima especie y la k -ésima densidad; $SP f Tr_{il}$ = efecto de la interacción entre la i -ésima especie y el l -ésimo tipo de rebrote; E_{ijkl} = error aleatorio residual.

Se usaron los paquetes estadísticos SAS Versión 9.2 (SAS Institute Inc. 2008), Infostat® (Universidad Nacional de Córdoba, Argentina) y Sigma Plot® 8.1 (Systat Software, Inc. San José California, USA).

Resultados y Discusión

Rebrotos proventicios. La especie *Acacia dealbata* en la densidad de 5,000 árboles ha⁻¹ registró la cantidad mayor de rebrotos proventicios en todas las densidades de plantación durante las evaluaciones realizadas, con valores entre uno y 19 rebrotos. Durante la evaluación del 2014, cerca del 85% de las cepas presentaron entre cuatro y cinco rebrotos en las densidades de 10,000 y 15,000 árboles ha⁻¹; mientras que el número máximo fue de siete rebrotos, alcanzando una altura promedio de 2.46 m y un diámetro a la altura del cuello (Dac) de 21 mm para los rebrotos en las tres densidades.

Transcurrido el tiempo, la altura promedio de los rebrotos alcanzo 3.2 m y en el diámetro hasta 27 mm, registrando un ajuste en el número de rebrotos al aumentar la densidades de plantación; como se puede apreciar en la evaluación del 2015, donde en las densidades de 5,000 y 10,000 árboles ha⁻¹ el 91% de los cepas presentaron cinco rebrotos y alcanzando un máximo de siete para el 9% restante. En la densidad de 15,000 árboles ha⁻¹, el 87% de las cepas mostraron únicamente tres rebrotos proventicios, llegando a reportar hasta cinco rebrotos para el resto de las cepas evaluadas. En esta densidad se observó reducción considerable en el número de rebrotos proventicios, a medida que transcurrió el tiempo de evaluación, principalmente por competencia en espacio de crecimiento y nutrientes inter e intra cepas, estos resultados concuerdan con lo reportado por Valero y Picos (2009), donde evaluaron la dinámica de brotación en parcelas invadidas de *A. dealbata* en Galicia, registrando en los primeros meses de crecimiento un promedio de brotación entre 7 y 21 rebrotos por tocón.

En *E. denticulata*, la evaluación del 2014, aproximadamente el 80% de las cepas mostraron tres rebrotos proventicios, alcanzó un máximo entre los siete y ocho rebrotos para el resto de las cepas, con altura promedio de 2.33 m y un Dac de 21.57 mm para las tres densidades. En 2015, se redujo el número de rebrotos proventicios y en las densidades de plantación de 10,000 y 15,000 árboles ha⁻¹ se observó que el 94% de las cepas mostraron dos rebrotos. En el caso de la densidad de plantación de 5,000 árboles ha⁻¹, el 91% de las cepas presentaron tres rebrotos, alcanzando a desarrollar hasta cuatro rebrotos como máximo de las cepas faltantes, lo que

respecta a las variables de estado a nivel de rebrotes, la altura promedio llego a los 4.77 m y el Dac hasta los 42.91mm.

En *E. globulus* el total de las cepas evaluadas en las tres densidades de plantación, mostraron entre cuatro y cinco rebrotes proventicios en el 2014, esta especie a pesar que registró menor número de rebrotes cuenta con mejores características físicas, alcanzando en esta fecha una altura de 3.35 m y un Dac de 29 mm. Después, transcurrido un año (2015), casi el 100% de las cepas se redujeron entre dos y tres rebrotes registrando una altura promedio de 7.2 m y un Dac de 55 mm. Asimismo, se observó que una alta proporción de cepas presentaron entre uno y dos rebrotes en la densidad de 15,000 árboles ha⁻¹. Villegas (2003), evaluó el efecto del espaciamiento del tocón en el número de rebrotes a los 60 días de crecimiento en *E. globulus*, reportando efecto no significativo, esto atribuido a la temprana evaluación (2 meses), donde el crecimiento inicial del rebrote depende de la planta madre (cepa) aportando soporte y nutrientes, pero esto no sucede después de 24 meses de crecimiento, como fue en este estudio, donde los rebrotes compitieron inter e intra cepas disminuyendo considerablemente el número de rebrotes.

En las tres especies evaluadas se registró variación en la altura y diámetro como ajuste del número de rebrotes, en función al número de árboles ha⁻¹ y el grado de avance en el tiempo. La información generada podrá utilizarse para adecuar planes de manejo en cultivos de corta rotación, mediante el ajuste natural del número de los rebrotes en ciclos cortos, para producción de biomasa con fines dendroenergéticos o mejorar la calidad en la madera mediante podas, para otro tipo de aprovechamiento que se pretenda dar al producto (e.g. aserrío u obtención de pulpa).

Análisis combinado de rebrotes adventicios y proventicios. La evaluación en diferentes fechas (10, 21 y 31 meses) permitió visualizar la dinámica del número de rebrotes adventicios y proventicios en cada especie, densidad de plantación y periodo de crecimiento (Tabla 12). En el caso de *A. dealbata* a los diez meses de crecimiento se observó un número alto de rebrotes adventicios en la densidad de 15,000 árboles ha⁻¹, con una media de ocho y valores extremos de uno hasta 37 rebrotes. Como consecuencia del número alto de rebrotes adventicios en la densidad de 15,000 árboles ha⁻¹, se apreció reducción continua a los 21 meses con cinco rebrotes y 31 meses con tres rebrotes adventicios. En la densidad de plantación de 10,000 árboles ha⁻¹,

se detectó respuesta irregular y se alcanzó un promedio de dos rebrotes adventicios y un máximo de 7 rebrotes por tocón al final de la evaluación. En la densidad de 5,000 árboles ha⁻¹, el número de rebrotes adventicios fue menor, con fluctuación promedio entre tres y dos para las tres fechas de evaluación (Tabla 12).

El número de rebrotes de tipo proventicios en esta especie, en la primera fecha de evaluación (10 meses) registró cuatro rebrotes y un rango de dos a ocho rebrotes en la densidad de 5,000 árboles ha⁻¹. Asimismo, se presentó una reducción del promedio de este tipo de rebrote en la evaluación realizada a los 21 meses, con un valor de tres y rango entre uno y cuatro; manteniendo cuatro rebrotes al final de la evaluación (31 meses). En las densidades de 10,000 y 15,000 árboles ha⁻¹, a medida que avanzó el tiempo de evaluación se redujo el número de rebrotes y la variabilidad entre cepas, se observó que después del corte, en la densidad de 5,000 árboles ha⁻¹, el tocón quedó expuesto a la radiación solar directa y al viento, lo que aceleró el proceso de cicatrización de la zona del corte y esto redujo la producción de tejido calloso, en el cual se originan las yemas de tipo adventicio. Lo anterior, favoreció la formación de rebrotes proventicios, los cuales mostraron un promedio alto (4 rebrotes) en todas las densidades de plantación, a los 31 meses después del corte (Tabla 12).

E. denticulata mostró una cantidad alta de rebrotes adventicios en la primera fecha de evaluación, lo cual fue más evidente en las densidades de plantación de 10,000 árboles ha⁻¹, con cinco rebrotes y en 15,000 árboles ha⁻¹ de siete rebrotes en promedio (Tabla 12). Además, se observó una fuerte variación entre cepas y valores máximos de hasta 25 rebrotes adventicios por tocón. Este número disminuyó de forma considerable en las evaluaciones realizadas a los 21 y 31 meses en todas las densidades. También esta reducción la presentaron los rebrotes proventicios variando de cinco a dos rebrotes, registrando la mayor cantidad en la densidad de 5,000 árboles ha⁻¹.

Durante la primera evaluación realizada después de 10 meses de crecimiento en *E. globulus*, se observó un mayor número promedio de rebrotes adventicios en la densidad de 5,000 árboles ha⁻¹, con ocho, y número máximo de 36 rebrotes (Tabla 12). En las evaluaciones siguientes (21 y 31 meses después del corte) se apreció disminución de los valores y éstos

llegaron a un promedio de tres y dos respectivamente en este tipo de rebrotes. El número de rebrotes proventicios en esta especie, varió de seis a cinco para las tres densidades en la primera fecha de evaluación (10 meses), disminuyendo considerablemente en el transcurso de crecimiento, quedando dos rebrotes por tocón en las tres densidades de plantación (Tabla 12). En todas las especies y densidades de plantación se redujo el número de rebrotes a través del tiempo, tanto adventicios como proventicios, debido principalmente a la eliminación natural de los rebrotes débiles. Lo anterior, a causa por la competencia en espacio y radiación solar (Goel y Singh 2008, Sarmiento y Ávila 2007), ya que se ha observado que la disminución de la intensidad luminosa influye en la iniciación de los rebrotes (Meier *et al.* 2012).

Tabla 12. Número de rebrotes proventicios y adventicios en cepas de tres especies dendroenergéticas evaluadas en tres fechas y densidades de plantación.

| Especie | Tipo de rebrote | Edad (meses) | Número de rebrotes por densidad de plantación | | |
|-----------------------|-----------------|--------------|-----------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | | | 5,000 árboles ha ⁻¹ | 10,000 árboles ha ⁻¹ | 15,000 árboles ha ⁻¹ |
| <i>A. dealbata</i> | Proventicios | 10 | 4 ± 2 (2-8) | 5 ± 3 (1-11) | 6 ± 11 (1-13) |
| | | 21 | 3 ± 1 (1-4) | 4 ± 2 (1-10) | 5 ± 3 (1-17) |
| | | 31 | 4 ± 2 (1-4) | 4 ± 2 (1-8) | 4 ± 3 (1-11) |
| | Adventicios | 10 | 2 ± 1 (2-4) | 4 ± 5 (2-16) | 8 ± 10 (1-37) |
| | | 21 | 3 ± 1 (2-4) | 5 ± 2 (2-7) | 5 ± 4 (2-17) |
| | | 31 | 3 ± 1 (2-3) | 2 ± 2 (1-7) | 3 ± 2 (1-8) |
| <i>E. denticulata</i> | Proventicios | 10 | 5 ± 1 (2-9) | 4 ± 2 (2-10) | 4 ± 1 (2-7) |
| | | 21 | 3 ± 1 (1-6) | 3 ± 1 (1-6) | 3 ± 1 (1-9) |
| | | 31 | 2 ± 1 (1-6) | 2 ± 1 (1-5) | 2 ± 1 (1-4) |
| | Adventicios | 10 | 3 ± 3 (1-9) | 5 ± 6 (2-25) | 7 ± 5 (1-24) |
| | | 21 | 3 ± 1 (1-6) | 5 ± 2 (1-7) | 3 ± 2 (1-11) |
| | | 31 | 2 ± 1 (1-4) | 2 ± 2 (1-6) | 2 ± 1 (1-8) |
| <i>E. globulus</i> | Proventicios | 10 | 6 ± 2 (2-11) | 5 ± 2 (1-10) | 5 ± 2 (1-9) |
| | | 21 | 4 ± 2 (2-7) | 3 ± 1 (1-7) | 3 ± 1 (1-6) |
| | | 31 | 2 ± 2 (1-5) | 2 ± 1 (1-6) | 2 ± 2 (1-5) |
| | Adventicios | 10 | 8 ± 8 (1-36) | 6 ± 4 (1-15) | 7 ± 7 (1-15) |
| | | 21 | 3 ± 3 (1-13) | 3 ± 1 (1-7) | 2 ± 2 (1-9) |
| | | 31 | 2 ± 1 (1-6) | 2 ± 1 (1-4) | 2 ± 1 (1-9) |

Valor medio, ± = desviación estándar y rango observado (mínimo-máximo). Fuente: Elaboración propia.

En otros estudios se demostró la importancia del diámetro del tocón, en la probabilidad de rebrote propia de algunas especies arbóreas y se estableció que los árboles adultos tuvieron menor capacidad de rebrote (Sands y Abrams 2009). En este estudio se utilizaron cepas jóvenes

de dos años con diámetros entre cinco y ocho cm en *E. denticulata* y de cinco a siete cm para *E. globulus* y *A. dealbata*, mostrando buena respuesta al rebrote. También se han observado diferencias para el número de rebrotes entre clones, edad de corte y altura del tocón (McCarthy *et al.* 2014).

Densidad básica. Se detectó diferencias significativas en la densidad básica de la madera entre especies, periodos de evaluación y la interacción de ambos. Los tipos de rebrotes (adventicios y proventicios) mostraron igualdad estadística en las tres especies estudiadas. En 2014, *E. denticulata*, registró los valores más altos entre 520 y 570 kg m⁻³. Los rebrotes de *A. dealbata* mostraron valores inferiores, en un rango entre 440 y 500 kg m⁻³; mientras que en *E. globulus* se registraron valores entre 450 y 500 kg m⁻³ (Tabla 13). En el caso de los valores de esta especie, se observó que concuerdan con lo reportado por Igartúa y Monteoliva (2010), donde evaluaron la densidad básica de la madera en plantaciones adultas de tallo único (uni-fustales), reportando valores promedios entre 480 y 503 kg m⁻³.

Tabla 13. Valores medios para la densidad básica de rebrotes en tres especies con potencial dendroenergético establecidas en tres densidades de plantación.

| Especies | Densidad Básica kg m ⁻³ 2014 | | Densidad Básica kg m ⁻³ 2015 | |
|---------------------------------|-----------------------------------------|--------------|-----------------------------------------|--------------|
| | Adventicios | Proventicios | Adventicios | Proventicios |
| 5,000 árboles ha ⁻¹ | | | | |
| <i>A. dealbata</i> | 440A | 480Aa | -- | 450Aa |
| <i>E. denticulata</i> | 540Ba | 520Aa | 490Ab | 490Ba |
| <i>E. globulus</i> | 450Aa | 500Aa | 440Aa | 430Ab |
| 10,000 árboles ha ⁻¹ | | | | |
| <i>A. dealbata</i> | 500Aa | 460Aa | 380Ab | 460Aa |
| <i>E. denticulata</i> | 550Ba | 560Ba | 470Bb | 480Ab |
| <i>E. globulus</i> | 500Aa | 500Ca | 450Ba | 470Aa |
| 15,000 árboles ha ⁻¹ | | | | |
| <i>A. dealbata</i> | 470A | 470Aa | -- | 450Aa |
| <i>E. denticulata</i> | 570Ba | 540Ba | 470Ab | 470Ab |
| <i>E. globulus</i> | 480Aa | 500Ba | 420Ba | 460Ab |

Diferentes letras mayúsculas muestran diferencias significativas entre especies dentro del mismo año; diferentes letras minúsculas muestran diferencias entre años. Fuente: Elaboración propia.

En 2015, se redujeron los valores de la densidad básica en todas las especies evaluadas, aunque *E. denticulata* conservó la superioridad numérica con valores entre 470 y 490 kg m⁻³. En *A. dealbata* los valores fluctuaron entre 380 y 460 kg m⁻³, mientras que en *E. globulus* se registró un intervalo entre 430 y 470 kg m⁻³ (Tabla 13). Los valores de *A. dealbata* fueron similares a los reportados por Pinilla y Hernández (2010), donde evaluaron plantaciones de *A. dealbata* con tallo único en diferentes localidades de la región del Biobío, registrando valores para la densidad básica de la madera desde 318 hasta 544 kg m⁻³. Además, en dicho estudio se observó que los valores más bajos se obtuvieron en los árboles más jóvenes (414-466 kg m⁻³) y se registró variación con base en el sitio experimental y parte del tallo muestreada, con mayor densidad básica en la base del fuste (558 a 590 kg m⁻³).

La reducción de la densidad básica entre años registrada en el presente estudio se debió principalmente al efecto del crecimiento primario, el cual modificó la posición de la distancia desde la base en relación con los sitios de muestreo a diferentes alturas del fuste (Igartúa *et al.* 2015). En eucalipto se ha observado también variación de la densidad básica de la madera dentro del árbol, lo cual se relacionó con las diferentes edades formativas del tallo y la morfología de las fibras (Igartúa y Monteoliva 2010). En *Eucalyptus regnans*, la densidad básica disminuyó (404 Kg m⁻³) entre la base y el 4.5% de la altura total del árbol y luego aumentó (462 Kg m⁻³) hasta el 70% de la altura del árbol (Omonte y Valenzuela 2011).

Conclusiones

Todas las especies evaluadas (*Acacia dealbata*, *Eucalyptus denticulata* y *Eucalyptus globulus*) presentaron capacidad de brotación en cepas de dos años y pueden ser manejadas como cultivos de monte bajo (SRC). Con ello, se incrementará el número de tallos por unidad de superficie. Aunque la densidad básica de la madera fue más alta en *E. denticulata*, se observó que las tres especies cuentan con características similares a plantaciones adultas de tallo simple, por lo que pueden ser utilizadas para la producción de biomasa dendroenergética a partir de rebrotes, disminuyendo costos de replantación y ciclos de aprovechamiento.

Referencias

- Arango B, JF Hoyos, AM Vásquez. 2001. Variación de la densidad básica de la madera de *Eucalyptus grandis* en arboles de siete años de edad. *Revista Facultad Nacional de Agronomía* 54:1275-1284.
- Camps M, F Marcos. 2002. Los biocombustibles. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa. 366 p.
- de Simon E, I Bocio. 1999. Modelo de restauración de encinares basado en el tratamiento de roza entre dos tierras del matorral de encinas. *Forest Systems* 8:249-260.
- Geldres E, V Gerding, JE Schlatter. 2006. Biomasa de *Eucalyptus nitens* de 4-7 años de edad en un rodal de la X Región, Chile. *Bosque (Valdivia)* 27:223-230.
- Goel V, B Singh. 2008. Growth and productivity potential of *Dalbergia sissoo* in short rotation coppice system on sodic soil. *Indian Journal of Forestry* 31:491-499.
- Hoogwijk M, A Faaij, B Eickhout, B de Vries, W Turkenburg. 2005. Potential of biomass energy out to 2100, for four IPCC SRES land-use scenarios. *Biomass and Bioenergy* 29:225-257.
- Igartúa D, S Monteoliva. 2010. Densidad básica, longitud de fibras y crecimiento en dos procedencias de *Eucalyptus globulus* en Argentina. *Bosque (Valdivia)* 31:150-156.
- Igartúa D, S Monteoliva, M Monterubbianesi, M Villegas. 2015. Calidad del leño en *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus*: II. Variaciones en la densidad básica y la longitud de fibras en Lobería, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata* 105:29-39.
- INN INdN. 1986. NCh 176/2. Madera.parte 2: determinación de la densidad.:11.
- Mátyás C, G Varga. 2000. Effect of intra-specific competition on tree architecture and aboveground dry matter allocation in Scots pine. *Forest Systems* 9:111-119.
- McCarthy R, PM Ekö, L Rytter. 2014. Reliability of stump sprouting as a regeneration method for poplars: clonal behavior in survival, sprout straightness and growth. *Silva Fennica* 48.
- Meier AR, MR Saunders, CH Michler. 2012. Epicormic buds in trees: a review of bud establishment, development and dormancy release. *Tree Physiology* 32:565-584.

- Miranda I, H Pereira. 2015. Variation of wood and bark density and production in coppiced *Eucalyptus globulus* trees in a second rotation. *Journal of Biogeosciences and Forestry* 9:270-275.
- Omonte M, L Valenzuela. 2011. Variación radial y longitudinal de la densidad básica en árboles de *Eucalyptus regnans* de 16 años. *Maderas. Ciencia y tecnología* 13:211-224.
- Pereyra O, M Gelid. 2002. Estudio de la variabilidad de la densidad básica de la madera de *Pinus taeda* para plantaciones de Misiones y norte de Corrientes. *Floresta* 33.
- Petro R, F Laswai, M Mijai, G Nyaradani, C Balama. 2015. A review on tree species suitability for wood fuel in Kilimanjaro region. *Journal of Environment and Earth Science* 5:23-27.
- Pinilla J, G Hernández. 2010. Poder calorífico de *Acacia dealbata* Link crecida en Chile. *Ciencia e Investigación Forestal, CIFOR*, v.16:n3:353-379.
- Quiroz I, MP Pincheira, JA Hernández, M González, E García, H Soto. 2014. Efecto del volumen radicular sobre el crecimiento de *Acacia dealbata* Link. en vivero y en terreno en el secano de la región del Biobío, Chile. *Revista Árvore* 38:155-164.
- Sands B, M Abrams. 2009. Effects of Stump Diameter on Sprout Number and Size for Three Oak Species in a Pennsylvania Clearcut. *Northern Journal of Applied Forestry* 26:122-125.
- Sarmiento EP, JA Ávila. 2007. Efecto de intensidad de luz sobre los componentes de materia seca en brotes de nogal (*Carya illinoensis* K. Koch) *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* 6:103-107.
- SAS Institute Inc. 2008. SAS/STAT 9.2 user's guide. North Carolina. SAS Institute Cary, NC.
- Sixto H, M Hernández, M Barrio, J Carrasco, I Cañellas. 2008. Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión. *Forest Systems* 16:277-294.
- Valencia S, J Vargas. 1997. Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques* 3:81-87.
- Valero E, J Picos. Year. Parcelas invadidas por *Acacia dealbata* Link. Evaluación de su potencial aprovechamiento incluyendo bioenergía. In Memoria del 5º Congreso Forestales Español., 21 a 25 de septiembre. 'Proceedings'. Ávila, España. 12 p.

- Villegas I. 2003. Manejo de rebrotes de *Eucalyptus globulus* Labillardiere en el altiplano mexicano. Tesis Chapingo, México :. División de Ciencias Forestales. , Universidad Autónoma de Chapingo. . 58 p.
- Vita A, MT Serra, I Grez, M González, A Olivares. 1997. Respuesta del rebrote en espino (*Acacia caven* (Mol.) Mol.) sometido a intervenciones silviculturales en zona árida de Chile. *Ciencias Forestales*:12-13.



VIII. CONCLUSIONES GENERALES

El éxito de cultivos forestales bajo un sistema de monte bajo está relacionado con la elección de especies de fácil brotación y el mantener la supervivencia en las primeras etapas de crecimiento de la plantación inicial, *Eucalyptus globulus* es la especie que reporto altas tasas de supervivencia al final del ciclo de corta (2 años), y un gran nivel de brotación en la mayoría de los sitios y producción de numerosos rebrotes proventicios; así como, el mayor incremento del diámetro y altura de los rebrotes dominantes. La especie *Acacia dealbata* puede ser utilizada en algunos sitios como especie de monte bajo, para la producción de biomasa dendroenergética, aunque es necesario asegurar la supervivencia en el primer ciclo de corta (cepas vivas) mediante la aplicación de métodos de silvicultura intensiva. Además, es necesario ajustar el manejo forestal para incluir acciones encaminadas al control del consumo ejercido por la fauna silvestre (lagomorfos).

El diámetro a la altura del cuello, la altura promedio de los dos principales rebrotes y el número total de rebrotes proventicios, están altamente correlacionados en la estimación de biomasa aérea total y de componentes. Se pudo llegar a buenas estimaciones de biomasa aérea en *A. dealbata*, *E. denticulata* y *E. globulus* utilizados como cultivos dendroenergéticos de segunda rotación a partir de rebrotes, el modelo típico mostró menor ajuste en sus parámetros de regresión, pero aceptable en comparación a otros estudios relacionados. Por otra parte, los modelos probados por género incrementaron la validez estadística de cada especie y la inclusión de variable dummy nos ayudó a identificar el efecto edad-especie en las estimaciones de la biomasa aérea total y por componente.

El rendimiento entre las tres especies difiere significativamente, indicando que la especie con mayor producción de biomasa es en *E. globulus*. El crecimiento en Dac y altura total fue significativamente mayor en las especies de *Eucalyptus* en contraste con *A. dealbata*. El particionamiento en biomasa varía entre las especies, el fuste es el componente del árbol que más aporta a la biomasa total desde el desarrollo de rebrotes, seguido por el las ramas y las hojas, el aporte del fuste supera aproximadamente 65% de la biomasa total en las tres especies.

En la recopilación y análisis descriptivo de artículos científicos relacionados con modelos alométricos en rebrotes de plantaciones dendroenergéticas, se pudieron identificar los métodos y técnicas utilizadas en la estimación de biomasa en el sistema SRC. En la mayoría de los conjuntos de datos en este análisis destacó el modelo exponencial.

Todas las especies evaluadas (*Acacia dealbata*, *Eucalyptus denticulata* y *Eucalyptus globulus*) presentaron buena capacidad de brotación en cepas de dos años y pueden ser manejadas como cultivos de monte bajo (SRC). La densidad básica de la madera a pesar de que fue mayor en *E. denticulata*, las tres especies cuentan con características similares a plantaciones adultas unifustales, pudiendo ser utilizadas para la producción de biomasa dendroenergética a partir de rebrotes, disminuyendo costos de replantación y ciclos de cosecha.



Referencias generales

- Álvarez R, R Fuentes. 2004. Patrones de especialización y crecimiento sectorial en Chile. *Documentos de Trabajo (Banco Central de Chile):1*.
- Baral A, G Guha. 2004. Trees for carbon sequestration or fossil fuel substitution: the issue of cost vs. carbon benefit. *Biomass and Bioenergy* 27:41-55.
- Blanco S, M Hernández, P Ciria, J Carrasco, I Canellas. 2010. Manual de cultivo de *Populus* spp. para la producción de biomasa con fines energéticos. Madrid. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria Ministerio de Ciencia e Innovación. 57 p.
- Brassiolo M, C Gomez, M Abt. 2007. Regeneración de un rodal de Tipa blanca utilizando brotes de cepas [Método de Monte Bajo]. *Revista de Ciencia y Tecnología* 3:44-53.
- Brown S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. Rome. FAO Forestry Paper 134. 55 p.
- Camps M, F Marcos. 2002. Los biocombustibles. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa. 366 p.
- Carroll A, C Somerville. 2009. Cellulosic biofuels. *Annual review of plant biology* 60:165-182.
- Castillo G, P Maldonado. 2004. Situación de la energía en Chile: Desafíos para la sustentabilidad. Santiago de Chile 117 p.
- Clutter J, J Fortson, L Pienaar, G Brister, R Bailey. 1983. Timber management: a quantitative approach. New York, USA. John Wiley & Sons, Inc. 307 p.
- Deffeyes KS. 2005. Beyond oil: The view from Hubberts Peak (Hill and Wang). New York, USA. 197 p.
- Dimitriou I, P Aronsson. 2005. Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *UNASYLVA-FAO- 56:47*.
- Donoso PJ, LA Otero. 2005. Hacia una definición de país forestal:¿ Dónde se sitúa Chile? *Bosque* 26:5-18.
- Domingues RMA, DJS Patinha, GDA Sousa, JJ Villaverde, CM Silva, CSR Freire, AJD Silvestre, C Pascoal Neto. 2011. *Eucalyptus* biomass residues from agro-forest and pulping industries as sources of high-value triterpenic compounds. *Cellulose Chemistry and Technology* 45:475-481.

- Elizalde HA, M González. 2008. Chile:¿ autosuficiencia o " autismo" energético?: La tensión entre integración regional y sustentabilidad. *Polis (Santiago)* 7:37-62.
- Evans A, V Strezov, TJ Evans. 2010. Sustainability considerations for electricity generation from biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14:1419-1427.
- Figuroa E. 2009. Escenario Energético de Chile. *Seguridad y eficiencia energética: Un aporte científico para la generación de políticas públicas* 51.
- Houghton AJ, AJ Bond, AA Lovett, T Dockerty, G Sünnerberg, SJ Clark, DA Bohan, RB Sage, MD Mallott, VE Mallott. 2009. A novel, integrated approach to assessing social, economic and environmental implications of changing rural land-use: a case study of perennial biomass crops. *Journal of Applied Ecology* 46:315-322.
- Hauk S, T Knoke, S Wittkopf. 2014. Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29:435-448.
- Henry M, N Picard, C Trotta, R Manlay, R Valentini, M Bernoux, L Saint André. 2011. Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations. *Silva Fennica* 45:477-569.
- Hinchee M, W Rottmann, L Mullinax, C Zhang, S Chang, M Cunningham, L Pearson, N Nehra. 2009. Short-rotation woody crops for bioenergy and biofuels applications. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant* 45:619-629.
- IEA. 2006. Internacional Energy Agency. World energy Outlook 2006. Paris/France: Internacional Energy Agency.
- Lahsen A, J Rojas, D Morata, D Aravena. 2015. Geothermal exploration in Chile. In Proceedings World Geothermal Congress 2015. 19-24 p.
- Martí BV. 2006. Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. *Revista Ecosistemas* 15:77-86.
- Martín FM. Year. Generación de energía eléctrica con biomasa a medio y largo plazo. In Anales de mecánica y electricidad. 22-27 p.
- Mead DJ. 2005. Opportunities for improving plantation productivity. How much? How quickly? How realistic? *Biomass and Bioenergy* 28:249-266.
- Meneses M, S Guzmán. 2000. Productividad y eficiencia en la producción forestal basadas en las plantaciones de pino radiata. *Bosque* 21:3-11.

- Molina J, H Rudnick. Year. Expansión de la red para la integración de ERNC: ¿ Oportunidades para América Latina? In The 9th Latin-American congress on electricity generation and transmission - CLAGTEE 2011 6-9 November. 'Proceedings'. Mar del Plata, Argentina. 6-10 p.
- Montoya C. 2009. Salud, cambio climático y contaminación. Actualización acerca de las fuentes alternativas de energía en Chile. *Cuad Méd Soc (Chile)* 49:280-307.
- Morales L, E Acevedo, G Castellaro, L Román-Osorio, J Morales-Inostroza, F Alonso. 2015a. A simple method for estimating suitable territory for bioenergy species in Chile. *Ciencia e investigación agraria: revista latinoamericana de ciencias de la agricultura* 42:227-242.
- Morales M, S Gonzalez-García, G Aroca, M Moreira. 2015b. Life cycle assessment of gasoline production and use in Chile. *Science of The Total Environment* 505:833-843.
- Mugasha W, T Eid, O Bollandsås, RE Malimbwi, S Chamshama, E Zahabu, J Katani. 2013. Allometric models for prediction of above- and belowground biomass of trees in the miombo woodlands of Tanzania. *Forest Ecology and Management* 310:87-101.
- Muukkonen P, R Mäkipää. 2006. Biomass equations for European trees: addendum. *Silva Fennica* 40:763-773.
- Návar J. 2009. Biomass component equations for Latin American species and groups of species. *Annals of Forest Science* 66:1-21.
- Nilsson G, C Rodríguez. 2012. Biomasa en Chile. . In Tenth Latin American and Caribbean Conference (LACCEI), 23-27 July. Panama City, Panama. 1-10 p.
- Novoa R, S Villaseca, P Del Canto, J Rouanet, C Sierra, A Del Pozo. 1989. Mapa Agroclimático de Chile. Santiago de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, INIA. 221 p.
- O'Ryan R, C De Miguel, M Pereira, C Lagos. 2008. Impactos económicos y sociales de shocks energéticos en Chile: un análisis de equilibrio general. Santiago de Chile. Banco Central de Chile. 54 p.
- Patiño J, R Smith. 2009. Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistémico. *Energética* 39:19-34.
- REN21. 2013. Renewables 2013 Global Status Report. *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21)*:178.

- Richardson J, T Verwijst. 2007. Multiple benefits from sustainable bioenergy systems. *Biomass and Bioenergy* 31:599-600.
- Rodríguez V. 2011. Dendroenergía en Chile: Presente, futuro y aportes desde la sociedad civil. *The bioenergy international. España*:28-29.
- Sandoval S. 2011. Modelación del crecimiento y rendimiento en biomasa aérea de ensayos dendroenergéticos. Tesis Doctorado. Concepción, Chile. Dpto. de Manejo de Bosques y Medio Ambiente, Universidad de Concepción. 183 p.
- Santelices R, Espinoza S, Cabrera A. Year. Especies potenciales para la obtención de biomasa con fines energéticos en el secano mediterráneo de Chile. In Tercer Congreso Latinoamericano IUFRO, 12-15 June 'Proceedings'. San José, Costa Rica. 45 p.
- Schlegel B, J Gayoso, J Guerra. 2000. Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Proyecto Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Valdivia, Chile. FONDEF-UACH-INFOR. 20 p.
- Searchinger T, R Heimlich, RA Houghton, F Dong, A Elobeid, J Fabiosa, S Tokgoz, D Hayes, T-H Yu. 2008. Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science* 319:1238-1240.
- Sixto H, M Hernández, M Barrio, J Carrasco, I Cañellas. 2008. Plantaciones del género *Populus* para la producción de biomasa con fines energéticos: revisión. *Forest Systems* 16:277-294.
- Spatari S, DM Bagley, HL MacLean. 2010. Life cycle evaluation of emerging lignocellulosic ethanol conversion technologies. *Bioresource technology* 101:654-667.
- Suárez J, G Martín. 2010. Producción de agroenergía a partir de biomasa en sistemas agroforestales integrados: una alternativa para lograr la seguridad alimentaria y la protección ambiental. *Pastos y Forrajes* 33:1-19.
- Volk T, T Verwijst, P Tharakan, L Abrahamson, E White. 2004. Growing fuel: a sustainability assessment of willow biomass crops. *Frontiers in Ecology and the Environment* 2:411-418.
- Wittelsbürger H. 2007. La política energética de Chile: de la dependencia al desarrollo sostenible. El futuro es de las energías renovables. *Diálogo Político*:35-52.
- Wompner F. 2010. Biocombustibles en Chile.¿ Una Alternativa Factible? Desarrollo Local Sostenible. *Revista desarrollo local sostenible* 3(9):1-15.

Zianis D, P Muukkonen, R Mäkipää, M Mencuccini. 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs*. 63 p.

