

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EXTRACCIÓN DE NUTRIENTES POR PLANTACIONES COMERCIALES DE
DIFERENTES EDADES DE *Eucalyptus globulus* Labill EN SUELOS DE LA
ZONA ESTE DE URUGUAY**

por

José Pedro UALDE AIRAUDO

**TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2015**

Tesis aprobada por:

Director: _____

Ing Agr (PhD) Amabelia del Pino

Ing Agr (Msc) Jorge Hernández

Ing Agr (Msc) Alejandro González

Fecha: 27 de agosto de 2015

Autor: _____

José Pedro Ualde Airaudó

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a toda mi familia, a Vicky y su familia, amigos, a los tutores de la tesis Ing Agr (Ph.D.) Amabelia Del Pino, Ing. Agr. (MSc) Jorge Hernández e Ing. Agr. (MSc) Alejandro González por su ayuda y consejos en todas las etapas del trabajo, también a todas las personas que trabajan en el laboratorio de fertilidad especialmente a Ing. Agr. Virginia Takata e Ing. Agr. Lucia Rocha. Al Ing. Agr. (Msc) Alvaro Califra, Ing. Agr. (Msc) Leticia Martínez con su gran ayuda en la salidas de campo, al Ing. Agr. Alvaro Díaz de la empresa Redalco S.A el cual nos oriento en los rodales de los sitios experimentales. También agradecer a biblioteca de Facultad de Agronomía, particularmente a Lic. Sully Toledo. Facultad de Ingeniería, especialmente al departamento de tecnología de la forestación y todo el equipo de trabajo, por prestarnos el molino para procesar las muestras de madera.

A las empresas Redalco S.A por disponer de los montes para el estudio, y por el apoyo logístico recibido en las evaluaciones realizadas y a Montes del Plata por la financiación de los estudios realizados. También a los trabajadores de la empresa Redalco S.A, por su ayuda en la cosecha de muestras.

A la Facultad de Agronomía, por la formación brindada durante estos años.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
 1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	 1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	4
2.1. DEFINICIÓN DE ECOSISTEMA FORESTAL	4
2.2. SUELOS FORESTALES DEL URUGUAY	4
2.3. ORIGEN DEL <i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	5
2.4. FISIOLOGÍA DEL ÁRBOL	6
2.5. PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN UN SISTEMA FORESTAL	8
2.5.1. <u>Distribución de la biomasa en árboles <i>Eucalyptus</i></u>	9
2.5.2. <u>Factores que determinan la producción de biomasa</u>	11
2.6. ELEMENTOS MINERALES	12
2.7. CICLO DE NUTRIENTES EN UN ECOSISTEMA FORESTAL.....	14
2.7.1. <u>Fundamento</u>	14
2.7.2. <u>Sostenibilidad en la producción</u>	16
2.7.3. <u>Dinámica de los nutrientes</u>	17
2.8. NUTRIENTES EN LOS COMPONENTES DE BIOMASA DE LOS ÁRBOLES.....	 19
2.8.1. <u>Concentración de nutriente por fracción vegetal</u>	20
2.8.2. <u>Cantidad de nutrientes absorbidos por plantaciones de <i>Eucalyptus</i></u>	22
2.8.3. <u>Factores que determinan el contenido de nutrientes en el árbol</u>	23

2.9.	EXPORTACIÓN DE NUTRIENTES DEL ECOSISTEMA FORESTAL.....	23
3.	<u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	25
3.1.	UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO	25
3.2.	CARACTERIZACIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL.....	26
3.2.1.	<u>Clima</u>	26
3.2.2.	<u>Suelos</u>	26
3.2.3.	<u>Características de los sitios experimentales</u>	29
3.3.	ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN	29
3.3.1.	<u>Selección de sitios</u>	29
3.3.2.	<u>Análisis de suelos</u>	30
3.3.3.	<u>Cosecha y análisis de las fracciones vegetales</u>	30
3.4.	CÁLCULOS REALIZADOS.....	31
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	32
4.1.	CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS DE LOS SITIOS EVALUADOS..	32
4.1.1.	<u>Propiedades químicas de los suelos de cada sitio experimental</u>	32
4.2.	PRODUCCIÓN DE BIOMASA	33
4.2.1.	<u>Producción de biomasa total por edad</u>	33
4.2.2.	<u>Datos dasométricos</u>	34
4.2.3.	<u>Proporción de la distribución de biomasa en cada fracción vegetal por edad</u>	37
4.2.4.	<u>Extracción de nutrientes</u>	43
4.2.5.	<u>Extracción total de nutrientes en cuatro rodales de <i>Eucalyptus globulus</i></u> ..	44
4.2.6.	<u>Extracción de nutrientes en las diferentes fracciones de cosecha para</u>	

<u>las diferentes edades de los árboles</u>	46
4.3. DISTRIBUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES A LO LARGO DEL FUSTE	50
4.4. RELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE NUTRIENTES EN MATERIAL VEGETAL Y PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO	52
4.4.1. <u>Relación entre contenido de bases en la fracción vegetal y los suelos de cuatro rodales de <i>E globulus</i> analizados.</u>	52
4.4.2. <u>Relación entre contenido de bases en la fracción madera y el suelo de otros estudios</u>	54
5. <u>CONCLUSIONES</u>	56
6. <u>RESUMEN</u>	58
7. <u>SUMMARY</u>	59
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	60
9. <u>ANEXOS</u>	66

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Grupos CONEAT de prioridad forestal y su superficie.....	4
2. Superficie afectada de suelos de prioridad forestal según la zona del país.....	5
3. Información de cada parcela experimental sobre tipo de suelo, relieve local, DAP promedio, altura promedio y ubicación geográfica.....	28
4. Valores de las propiedades químicas para los suelos correspondientes a los sitios estudiados.....	31
5. Biomasa total producida según edad y densidad de plantación en cuatro rodales de <i>Eucalyptus globulus</i>	32
6. Datos dasométricos en cuatro rodales de <i>Eucalyptus globulus</i>	33
7. Proporción de biomasa producida en cada fracción del árbol y rendimiento según fracción del árbol, en función de la edad del mismo para cuatro rodales de <i>Eucalyptus globulus</i>	36
8. Valores de concentración y extracción de nutrientes en madera y residuos para cuatro rodales de <i>Eucalyptus globulus</i>	41
9. Tasa de extracción de nutrientes considerando todas las fracciones del árbol, en $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, para cuatro rodales de <i>Eucalyptus globulus</i>	43
10. Porcentaje de cada nutriente (obtenido de kg ha^{-1}), estudiados en este trabajo, absorbido por la biomasa total a diferentes edades en cuatro parcelas de <i>Eucalyptus globulus</i>	46
11. Secuencia de mayor a menor de cada nutriente absorbido,	

estudiados en cada trabajo, a diferentes edades.

Datos de revisión bibliográfica..... 46

12. Comparativo entre concentración de nutrientes
en fracción madera y cantidad de catión bajo forma
intercambiable en suelos de diferente grupo CONEAT..... 52

Figura No.

1. Ubicación de los sitios experimentales en la zona..... 24
2. Mapa CONEAT de sitios Pololo 1, Cerro Molina y
Talayer..... 25
3. Mapa CONEAT del sitio El canelón..... 26
4. A) DAP y biomasa por árbol en función de la
edad de los árboles. B) altura y biomasa por árbol
en función de la edad de los árboles para cuatro
rodales de *Eucalyptus globulus*..... 34
5. Relación entre la producción promedio por año de
biomasa por árbol de *E.globulus* y
el DAP para las parcelas evaluadas..... 34
6. Relación entre la producción promedio por año
de biomasa por árbol de *E.globulus* y altura para las
parcelas evaluadas..... 35
7. Evolución de la producción de biomasa aérea
en las diferentes fracciones del árbol en cuatro
rodales de *Eucalyptus globulus*..... 37
8. Concentración de nutrientes en las diferentes fracciones
del árbol en cuatro rodales de *Eucalyptus glóbulus*
A) Concentración de N. B) Concentración de P.
C) Concentración de K. D) Concentración de Ca.

E) concentración de Mg.....	38
9. Cantidades totales de nutrientes en cuatro rodales de <i>E. globulus</i> en función de la edad de los árboles. A) N total. B) P total. C) K total. E) Mg total.....	42
10. Cantidad de nutrientes en las diferentes fracciones según edad de los árboles en cuatro rodales de <i>E. globulus</i> . A) Absorción de N. B) Absorción de P. C) Absorción de K. D) Absorción de Ca. E) Absorción de Mg.....	44
11. Concentración de nutrientes en los discos de madera correspondientes a troza basal (disco 1) y 4ª. Troza (ubicado a 7.20 m de altura en el árbol: disco 4) A) Concentración de N, B) Concentración de P, C) Concentración de K, D) Concentración de Ca y E) Concentración de Mg para los cuatro rodales de <i>Eucalyptus globulus</i> . Las barras indican desvío estándar de los 9 árboles.....	48
12. Relación entre contenido de nutrientes en madera y cationes en el suelo en cuatro rodales de <i>E. globulus</i> A) K. B) Ca. C) Mg. Los sitios El Canelón, Talayer, Pololo y Cerro Molina corresponden a las edades de 5; 7; 9 y 12 años respectivamente.....	50
13. Relación entre contenido de nutrientes en hoja y cationes en el suelo en cuatro rodales de <i>E. globulus</i> A) K. B) Ca. C) Mg. Los sitios El Canelón, Talayer, Pololo y Cerro Molina corresponden a las edades de 5; 7; 9 y 12 años respectivamente.....	51

1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo se realiza como uno de los requisitos para poder obtener el título de Ingeniero Agrónomo emitido por la Universidad de la República Oriental del Uruguay, Facultad de Agronomía. El mismo fue realizado en plantaciones comerciales de *Eucalyptus globulus* con destino a la producción de celulosa del Departamento de Rocha, Uruguay.

En Uruguay en el año 1987, se puso en práctica de la Ley de Desarrollo Forestal No. 15.939. Esto significó un punto de inflexión en el dinamismo productivo del sector forestal. Desde 1968 hasta 1987, se dio en promedio, un crecimiento de 166 hectáreas forestales plantadas por año. Hasta el año 1987, el sector contaba con una superficie de 31 mil hectáreas forestales plantadas (17 mil hectáreas de Eucaliptos, 11 mil de Pinos y 3 mil de otras especies) y contaba con zonas de prioridad forestal (suelos de los grupos CONEAT 2, 7, 8 y 9). Desde 1989 hasta fines 2005 el crecimiento tuvo una media de 40 mil hectáreas por año. En la actualidad la superficie ocupada, entre bosques naturales e implantados, es aproximadamente 1.500.000 hectáreas. Dicha ley promovió el desarrollo del sector debido a que habilitó fondos para subsidio y financiamiento, líneas de créditos de banco estatal con plazos largos, exoneraciones tributarias y durante el 2006 se incluyeron otros suelos de prioridad forestal. Las plantaciones se ubican mayoritariamente, de acuerdo a la superficie forestada, en los departamentos de Rivera, Río Negro, Tacuarembó, Paysandú, Lavalleja, Maldonado y Rocha (FAO, 2004).

Según la cartografía forestal de Uruguay realizada por la Dirección General Forestal, dentro de la superficie con Eucalipto la especie *Eucalyptus globulus* es una proporción importante y el resto es ocupada por *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunnii*, otros.

En el año 2010 se extrajeron de los campos forestales, 11 millones de metros cúbicos de biomasa, de los cuales el 78% fue para uso industrial y el resto para energía. La madera de uso industrial fue colocada en un 77% para la industria de la celulosa y el 23 % para la industria del aserrado y la producción de tableros (MGAP. OPYPA, 2011).

La producción forestal en Uruguay, además de verse favorecida tributariamente, presenta ventajas climáticas respecto a otros países del mundo debido a que el país se encuentra ubicado en las coordenadas entre los paralelos 30° y 35° de

latitud Sur y los meridianos 53° y 58° de longitud Oeste coincidiendo con determinadas zonas de Australia, país donde es el sitio de origen del género *Eucalyptus*.

Las condiciones climáticas del sitio donde se encuentra la masa forestal interaccionando con los árboles y el suelo constituyen un ecosistema forestal. En los ecosistemas forestales los árboles generan una gran influencia sobre los suelos donde crecen, y en menor grado sobre el clima de la región y los microclimas locales. La aptitud de una región, para el desarrollo positivo de los organismos vivos que la habitan, dependerá de una adecuada nutrición por parte del sitio y la influencia de la temperatura ambiental y precipitaciones (Pritchett, 1986).

Para lograr una producción forestal sustentable en el largo plazo es importante considerar la recirculación de nutrientes en los ecosistemas forestales. Para ello es importante tomar decisiones racionales durante el manejo de una plantación forestal sustentada en información obtenida en diferentes experiencias e investigaciones. González (2008) describió que para lograr una sustentabilidad en la producción forestal se debe considerar, además de un balance adecuado en el ciclo de los nutrientes, lograr un control de la erosión y una buena conservación del agua en el perfil del suelo. A través de ciclos geológicos, reacciones químicas y actividad biológica se logra la persistencia de nutrientes en los suelos, asegurándose la productividad continua del sitio (Pritchett, 1986). Los elementos minerales presentes en el ecosistema pueden ser importados o exportados del mismo. También estos pueden translocarse dentro de la planta y transportarse desde la planta hacia el suelo y viceversa. Remezov en el año 1959 describió esto como los sistemas geoquímico externo y sistema biológico interno (Pritchett, 1986).

Los nutrientes son absorbidos por los árboles y junto al proceso de fotosíntesis logran sintetizar biomasa. El diccionario de Ciencias Forestales de la Sociedad Española, citado por Tolosana (2009) define biomasa, desde el punto de vista ecológico, como “*Conjunto de sustancias orgánicas de los seres vivos existentes en un determinado lugar*” y también como “*materia orgánica correspondiente a la energía fijada a partir de la fotosíntesis de los vegetales*”. Un análisis cuantitativo de la biomasa es importante para poder tomar decisiones adecuadas en cuanto a la utilización de los productos forestales, considerando el equilibrio del ecosistema forestal y conservación del recurso suelo.

Las plantaciones forestales de eucalipto y pino en nuestro país han significado un cambio en el uso del suelo, desde su antiguo uso ganadero y/o agrícola al forestal, generando cambios en la demanda de los nutrientes del suelo. Se ha cuantificado la

magnitud de las extracciones de nutrientes a la cosecha de diferentes especies de eucalipto en diferentes regiones (González 2008, Giosa 2009, Varela 2009, Hernández et al. 2009, Yussim 2013, Hernández et al. 2013). Se ha determinado la cantidad de nutrientes que es capaz de extraer una plantación de eucalipto a los 10 años (edad promedio de cosecha en plantaciones para la producción de pulpa de celulosa), y cuánto de dicha extracción se exporta a través de la cosecha comercial. Sin embargo, no existe información nacional que permita conocer las tasas de absorción a diferentes edades de la plantación, y en qué medida puede estar relacionada con el tipo de suelo donde la especie crece. Esta información es necesaria no sólo para conocer la dinámica de absorción de nutrientes durante el ciclo de la plantación, sino que aporta información para el uso de modelos de extracción de nutrientes de los suelos.

Los objetivos del presente trabajo son:

1. Determinar la evolución con el tiempo de la extracción y concentración de nutrientes por la biomasa aérea de *Eucalyptus globulus* (madera, corteza, ramas y hojas) en suelos de aptitud forestal de la zona este del país (Grupos CONEAT 2).
2. Relacionar las cantidades extraídas con características de los suelos de los sitios.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 DEFINICIÓN DE ECOSISTEMA FORESTAL

Un ecosistema forestal se define como una comunidad biótica donde los árboles interactúan con el ambiente físico de la misma y actúan de forma dominante (Pritchett, 1986).

2.2 SUELOS FORESTALES DEL URUGUAY

Los suelos donde se realiza la actividad forestal comercial, están referenciados legalmente como suelos de prioridad forestal. Los suelos de prioridad forestal están definidos en base al grupo CONEAT al cual pertenecen. Los grupos CONEAT no son estrictamente unidades cartográficas básicas de suelo, sino que constituyen áreas homogéneas, definidas por su capacidad productiva en términos de carne bovina, ovina y lana en pie (Art. 65 de la Ley mencionada). Esta capacidad se expresa por un índice relativo a la capacidad productiva media del país, a la que corresponde el índice 100 (MAP.CONEAT 1979, MGAP. RENARE 2014).

En el Cuadro No. 1, extraído de SPF (2011), se pueden observar los diferentes grupos CONEAT de prioridad forestal, vinculados a la totalidad de hectáreas que le corresponden. De acuerdo a estos datos, se puede observar que existen 3.574.303 hectáreas (año 2009) de prioridad forestal en el territorio Uruguayo.

Cuadro No. 1. Grupos CONEAT de prioridad forestal y su superficie.

Grupo CONEAT	Superficie (ha)	% de grupos CONEAT de prioridad forestal
7	477.027	13,35
8	513.066	14,35
9	822.054	23,00
2	1.453.774	40,67
0.7	92.705	2,59
0.9	165.330	4,63
S 09	50.347	1,41
TOTAL	3.574.303	100

Fuente: SPF (2011)

Los grupos CONEAT de prioridad forestal, determinan que la producción forestal esté en diferentes zonas del país: sudeste, litoral oeste, norte y centro-este (Cuadro No. 2).

Cuadro No. 2. Superficie afectada de suelos de prioridad forestal según la zona del país.

Zona del país con suelos de prioridad forestal	Departamentos	Superficie afectada (ha)
Suelos zonas Sudeste	Rocha, Maldonado, Florida, Lavalleja	186.000
Suelos zona Litoral Oeste	Paysandú, Río Negro, Soriano	250.000
Suelos zona Norte	Rivera y Tacuarembó	280.000
Suelos zona Centro-Este	Durazno, Cerro Largo, Treinta y Tres	120.000

Fuente: SPF (2011)

2.3 ORIGEN DEL *Eucalyptus globulus* Labill.

La región natural del *Eucalyptus globulus* Labill es el sur de Australia y Tasmania. Las coordenadas donde se distribuye son 37°43'30" S ubicadas en localidades costeras y continentales, con altitud de 450m sobre el nivel del mar. Presenta un clima templado y frío de forma uniforme durante el año, con un promedio de temperaturas máxima de hasta 20 a 23°C y mínimas de 0 a 8°C, donde se dan hasta 40 eventos de heladas por año. El clima en dicha región también es sub húmedo o húmedo con un régimen de precipitaciones de 600 a 1400mm anuales con una mayor distribución hacia la estación invernal (Hall, Johnston y Marryatt, Boland et al., citados por Brussa, 1994). Su introducción al Uruguay se dio en 1853, donde su utilización se propagó de forma masiva. Actualmente es una especie demandada para la generación de paneles de celulosa. También su madera puede ser utilizada para construcciones en general, carpintería de obras, también de pisos, laminado y como uso combustible para la generación de energía (Brussa, 1994).

2.4 FISIOLÓGÍA DEL ÁRBOL

La nutrición de las plantas es un aspecto importante a tener en cuenta debido a que la falta de algún elemento mineral de importancia en el metabolismo de las mismas, puede ocasionarle problemas de mal crecimiento, mayor susceptibilidad frente al ataque de agentes patógenos e insectos, baja fructificación y en algunos casos puede acabar muriendo (Foelkel, 2005).

Los elementos minerales, son fundamentales para los procesos metabólicos que ocurren en las plantas. En el caso del N, es importante para la síntesis de proteínas y crecimiento de la planta. El P, determina el crecimiento de la planta constituyendo los ácidos nucleicos, fosfolípidos, fosfoproteínas, fosfoésteres, di nucleótidos, ADP y es fundamental para el proceso de fotosíntesis, transporte de electrones, regulación de algunas enzimas y transporte de carbohidratos. El K cumple la función de estabilización del pH, turgencia y osmoregulación. Además es fundamental para la síntesis de proteínas, carbohidratos y lípidos. Es un activador de enzimas. El boro es utilizado por las plantas en la división y crecimiento celular y se localiza en las paredes celulares. Si este se encuentra como limitante, puede ocasionar un crecimiento anormal, para el interés comercial, del árbol provocado por daños en ápice del mismo. El Ca está asociado a la formación de pectinas y laminilla media. Participa en la estabilidad de membranas celulares y en la división celular. El Mg es requerido para la síntesis de proteínas, también para activar muchas enzimas, regulación de pH celular y balance catión – anión (Dell et al., 1995)

Los elementos minerales dentro del árbol podemos clasificarlos como móviles o inmóviles. Los primeros corresponden al N, P y K, los cuales se translocarán desde órganos viejos a nuevos. Se define al nutriente translocado en el árbol como a la cantidad total de un elemento que es retirado de los tejidos viejos y es transferido hacia tejidos nuevos y en crecimiento (Dell et al., 1995)

Calcio, hierro, y boro son nutrientes inmóviles y quedan retenidos en los diferentes órganos del árbol, sin translocarse (Foelkel, 2005).

Los nutrientes móviles tienden a concentrarse en los tejidos de los órganos más jóvenes. Según Ferri, citado por Viera et al. (2013) el N se encuentra en mayor concentración en las hojas de la copa del árbol comparado a otras fracciones del mismo. Esto puede estar explicado, según Malavolta et al. (1997) debido a que dicho nutriente cumple un rol importante en el funcionamiento de las reacciones metabólicas siendo

parte de aminoácidos, proteínas, aminos, amidas, vitaminas, los cuales se dan de forma frecuente en las hojas debido al proceso de fotosíntesis.

Según Kozlowski et al., citados por Schumacher y Caldeira (2001), las hojas tienen alta cantidad de nutrientes debido a su capacidad de realizar fotosíntesis y transpirar.

La translocación de nutrientes en el árbol es de suma importancia debido a que se realiza para mantener su crecimiento. La translocación es variable de acuerdo a la etapa de desarrollo del árbol y no se limita a suelos de poca fertilidad (Fife y Nambiar, 1984).

Las plantas absorben agua y nutrientes del suelo en donde están arraigadas, y serán translocados hacia todos los órganos de la planta. Las hojas sintetizan compuestos orgánicos a partir del proceso de fotosíntesis. Dichos compuestos orgánicos serán translocados hacia hojas nuevas, tallo y raíces para incrementar su biomasa. Para que dichos procesos ocurran se requiere la presencia de elementos minerales disponibles. El floema es el responsable del transporte de savia elaborada (sustancias orgánicas) hacia todos los órganos del árbol, desde las hojas más nuevas hasta las raíces de menor diámetro. La corteza interna (floema) a su vez está próxima al cambium vascular. El floema es un tejido de conducción muy activo y dinámico. La savia elaborada es producto de la fotosíntesis y es una sustancia con altas concentraciones de azúcares, proteínas, ácidos grasos, nutrientes minerales (principalmente Ca, K, hierro, Mg, manganeso, P) y fitorreguladores. La función principal de las raíces es absorber el agua y elementos minerales del suelo. Para ello las raíces requieren energía. Cuando la savia elaborada no llega a las raíces, estas no pueden realizar la absorción y las hojas dejan de hacer fotosíntesis y finalmente el árbol no sobrevive. Para que ocurra el proceso de absorción de agua, elementos minerales, y translocación de los mismos es necesaria la participación del K, Ca, N, P, Mg, hierro, azufre y manganeso principalmente. Debido a que estos son importantes para que ocurran los procesos de transpiración, capilaridad, y generar una diferencia en el gradiente de concentración de elementos minerales entre las raíces y la solución del suelo. Mediante la transpiración se genera un flujo, por el cual el agua y los elementos minerales absorbidos, llegaran a las hojas (Foelkel, 2005).

Cuanto mayor es el índice de área foliar en una plantación forestal de *Eucalyptus* mayor será el área fotosintéticamente activa, por lo tanto habrá mayor producción de fotoasimilados y por consiguiente habrá mayor producción de biomasa total (Viera et al., 2012).

Durante la fase inicial de desarrollo de los árboles en una plantación forestal, los carbohidratos sintetizados por la fotosíntesis son destinados en mayor proporción a producir biomasa en la copa del árbol, hasta el momento que las copas de los árboles compiten entre sí, y a partir de dicho momento es cuando la producción de biomasa en el fuste comienza a aumentar progresivamente en relación a la síntesis de biomasa en la copa del árbol (Waring y Schlesinger 1985, Shumacher y Caldeira 2001).

En plantaciones comerciales de *Eucalyptus*, hasta los 1,5 y 3,0 años, la prioridad de los árboles es el desarrollo de sus copas. Hasta dicha edad los árboles presentan un 15 a 20% de su peso seco en las raíces, 10 a 12 % en las hojas, 8% en ramas, 10% en la corteza y entre 50 a 55% en la madera del tronco. Cuando alcanza los 7 años, tienen 70 a 75% de biomasa en la madera en relación al total del árbol. Cuando alcanza los 9 años la proporción de biomasa en madera respecto al total puede alcanzar un 80%. A partir los 6 y 7 años la acumulación de biomasa se da preferentemente en la madera, mientras que la acumulación en hojas, raíces y corteza será a una tasa menor (Foelkel, 2005).

2.5 PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN UN SISTEMA FORESTAL

Newbould y Pardé, citados por González et al. (2005), definen la biomasa como la cantidad de materia que existe en un determinado ecosistema por unidad de superficie o de volumen. Generalmente, la cantidad producida se expresa en términos de peso seco, masa o volumen (Balboa Murias, 2005). Cuando se realiza una plantación forestal de *Eucalyptus* con fines comerciales cuyo objetivo es la obtención de productos derivados de la madera del árbol, es de interés obtener una máxima producción de biomasa en el fuste del árbol con mínimas cantidades de biomasa formada en copas, corteza y raíces (Foelkel, 2005).

El análisis de biomasa producida se realiza en los diferentes órganos del árbol, siendo hojas, tronco y raíces, con el fin de cuantificar contenido de elementos minerales en cada una de las fracciones mencionadas (Foelkel, 2005), y también comprender la distribución de la materia orgánica en el individuo y en el ecosistema forestal. En función de esto tomar decisiones objetivas al realizar una producción forestal (Teller, citado por González et al., 2005). Se realiza una caracterización nutricional de la biomasa producida para lograr una producción sustentable considerando el status nutricional del sitio, la erosión del suelo y la alteración del ciclo de carbono (Nambiar y Brown, Fisher y Binkley, citados por Balboa Murias, 2005).

2.5.1 Distribución de la biomasa en árboles *Eucalyptus*

En cuanto a la distribución de la biomasa dentro del árbol, Curlin, citado por Schumacher y Caldeira (2001) afirmó que generalmente la distribución de la biomasa en las diferentes fracciones del árbol es: madera > ramas > corteza > hojas. Dicha distribución de las proporciones de acumulación de biomasa puede variar según la especie y también según las condiciones ambientales y procedencias (Caldeira, 1998). Otros autores coinciden que en árboles adultos de *Eucalyptus globulus*, la madera representa un 71 y 76 % del peso seco de la biomasa total, la corteza un 10 a 11%, las ramas un 7 a 8 % y las hojas de 8 a 10%. Balboa Murias (2005) afirma que se da un patrón de comportamiento de acumulación de biomasa, según los diferentes órganos, siendo: madera > corteza > hojas > ramas > ramillas.

González (2008) en *Eucalyptus globulus* de 10 años de edad, en un sitio forestal del Dpto. de Soriano (en Uruguay), encontró que del total de biomasa aérea (137.5 Mg ha⁻¹, expresada en peso seco), un 77% correspondió al fuste del árbol, y un 23% a corteza, ramas finas, medias, gruesas y hojas. Dicho 23% se considera como residuo de cosecha. El mismo autor observó en Rio Negro (en Uruguay) en un rodal de *Eucalyptus maidenii*, de 10 años de edad, que el fuste del árbol representó un 72% de la biomasa total (199.2 Mg ha⁻¹ de un total de 277.2 Mg ha⁻¹). También afirmó que en la edad en la cual se da la cosecha comercial de *Eucalyptus globulus*, dicha especie es la que presenta menor proporción de restos de cosecha comparado a otras especies del género, debido a que presenta una copa más pequeña, lo que es una característica distintiva de dicha especie, independiente al esquema de manejo que se realice.

Varela (2009) en suelos de basamento cristalino en la región Este del Uruguay (actualmente Cuchilla Dionisio), encontró en *Eucalyptus globulus* de 9 a 12 años de edad, valores similares de producción de biomasa promedio en trozas (100 Mg ha⁻¹), a una menor densidad a la cosecha, a los observados por González (2008) para la misma especie.

Giosa (2009) estudiando en *Eucalyptus grandis* de edades de 10 a 13 años en sitios ubicados en Rio Negro y Paysandú (en Uruguay) observó una producción promedio, entre todas las edades mencionadas, de biomasa en las trozas (madera del fuste) de los árboles de 189 Mg ha⁻¹.

Viera et al. (2012), en *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* de 10 años de edad plantados (1.142 árboles ha⁻¹) en Rio Grande do Sul, Brasil, obtuvieron como

resultado que la biomasa producida por los árboles se distribuía en 84,2% en la madera, 9,5% en corteza, 4,5% en ramas y 1,8% en hojas. La cantidad de biomasa aérea total producida, en dicho ensayo, fue de 198,5 Mg ha⁻¹.

Balboa Murias (2005) en su tesis doctoral en *Eucalyptus globulus* de 13 y 24 años observaron que la madera del fuste representa un 82% del peso total arbóreo, y la corteza un 7%, mientras que en la copa, considerando hojas y ramas finas y gruesas, representa un 11%. También afirma, en dicho trabajo, que los porcentajes de biomasa producida en la madera del fuste se relacionan exponencialmente con la edad de la plantación forestal, esto significa que a medida que aumenta la edad de la población, aumenta la proporción de peso de madera del fuste en el peso total (biomasa total). Además el incremento de biomasa ocurre con el aumento del área basal.

Un estudio realizado en *Eucalyptus globulus* de 13 y 24 años en las provincias de la Coruña y Pontevedra, España, por Balboa Murias (2005), afirma que la secuencia de acumulación de biomasa, de mayor a menor, en los diferentes órganos del árbol es la siguiente: madera > corteza > ramas gruesas > hojas = ramas finas > ramillos respectivamente.

Andrae, citado por Schumacher y Poggiani (1993), observó que el fuste del árbol representa la mayor cantidad de biomasa producida. Dicha proporción aumenta a medida que el árbol envejece. Tandon et al., citados por Schumacher y Poggiani (1993) estudiaron que para *Eucalyptus grandis*, para edades de 3, 7, 9, y 11 años, a medida que aumenta la edad y el diámetro, el porcentaje de biomasa en el fuste se incrementa, y en cambio la proporción de biomasa en la copa decrece.

Reis et al., citados por Viera et al. (2012), estudiaron la distribución de acumulación de la biomasa en diferentes edades en *Eucalyptus grandis* plantados en Cerrado, Brasil. Observaron que hasta los 15 meses de edad de la plantación forestal, la biomasa contenida en los componentes madera y corteza fue inferior a 45% de la biomasa total aérea. A los 73 meses de edad (6 años) la proporción de biomasa contenida en madera y corteza representó más de 85%. Viera et al. (2012) también observaron que en las primeras edades de los árboles *Eucalyptus* la proporción de biomasa aérea en madera y corteza es inferior a 50% y a partir de los 6 y 8 años la proporción de biomasa en madera y corteza es de 75% respecto al total de biomasa aérea. El trabajo realizado por Schumacher y Caldeira (2001) en una plantación de *Eucalyptus biscoitatus* de 4 años de edad, en Rio Grande do Sul, Brasil, observó que la copa representa un 28% en relación al total de biomasa del árbol, mientras que la madera del fuste 63% y la corteza 10%. También observó que la cantidad de biomasa total

producida fue de 63.3 Mg ha^{-1} . En otro trabajo realizado por Schumacher y Caldeira (2001) en Rio Grande do Sul con plantaciones de *Eucalyptus maidenii* de 4 años de edad, observaron que la madera del fuste representa 69% del total de biomasa, mientras que la corteza 9%. La biomasa producida en la copa del árbol, es decir en ramas y hojas, representa un 22.2% del total. En dicho estudio obtuvieron como resultado que la producción de biomasa total fue $83,2 \text{ Mg ha}^{-1}$.

En el estudio realizado por Balboa Murias (2005) observó en diferentes edades y densidades que el *Eucalyptus globulus* de 13 años en $1200 \text{ árboles ha}^{-1}$ y a la edad de 24 años a una densidad de $1150 \text{ árboles ha}^{-1}$, tienen una producción de biomasa para dicho sitio, de 142 y 426 Mg ha^{-1} , respectivamente. En cuanto a la productividad en biomasa anual, estos autores afirman que produce entre $10,2$ y 13 Mg ha^{-1} por año respectivamente.

Para diferentes autores, en diferentes especies del genero *Eucalyptus* en Australia, Portugal y España, citados por González et al. (2005), se dieron valores de biomasa producida entre $13 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $19 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En dichos estudios se registraron valores de biomasa de fracciones no maderables (corteza, hojas y ramas) de 3 y $6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

2.5.2 Factores que determinan la producción de biomasa

Según Kramer et al., citados por Schumacher y Caldeira (2001), cuando se encuentran diferencias en la acumulación de biomasa en los diferentes ensayos experimentales, se debe a factores que afectan la fotosíntesis y la respiración. Schumacher y Caldeira (2001), afirmaron que también se puede deber a factores vinculados a características edafoclimáticas del sitio, especie estudiada, la edad de los árboles en estudio y la densidad de plantación.

A medida que aumenta la densidad de plantación, la biomasa por unidad de área aumenta pero la biomasa total por individuo disminuye pero con una mayor asignación de fotoasimilados a la madera del fuste.

Los factores climáticos tienen una gran influencia sobre la productividad anual de las plantaciones forestales. También tiene una gran importancia la disponibilidad de nutrientes del sistema, en la productividad de las plantaciones forestales (Schumacher y Poggiani, 1993).

Se ha observado que todos los componentes del árbol, excepto la madera del fuste, a medida que avanza la edad en años presentan una reducción en la biomasa producida (Schumacher et al., 2011). La explicación de este comportamiento está en que la distribución de la biomasa producida en los diferentes compartimientos durante el desarrollo de los árboles de una plantación forestal depende de las fases nutricionales de los árboles (Gonçalves et al., citados por Schumacher et al., 2011). Durante el desarrollo de los árboles en una plantación forestal, en los primeros años antes que ocurra el cierre de copas, comienza un periodo de intenso crecimiento donde la mayor parte de los fotoasimilados producidos son utilizados para la formación de la copa, donde ocurre un aumento del área foliar, y desarrollo del sistema radicular. Durante dicha fase, el árbol explora parcialmente el suelo, y no existe competencia por factores de crecimiento (luz, agua y nutrientes del suelo) entre árboles. En dicha etapa el crecimiento depende principalmente de las propias condiciones fisiológicas del árbol.

Según datos obtenidos en el trabajo de Schumacher et al. (2011) se observa que los componentes hojas, ramas, corteza y raíz reducen su biomasa a medida que aumenta la edad del árbol. Mientras que la biomasa total y de madera del fuste se incrementan.

Uno de los factores que influyen en la distribución de biomasa en los diferentes compartimientos del árbol, es la productividad del sitio. Ante un sitio con baja fertilidad, se observó niveles elevados de biomasa producida en el sistema radicular, con el fin de que el árbol necesita explorar un mayor volumen de suelo para compensar la baja fertilidad del mismo.

2.6 ELEMENTOS MINERALES

Cuando se evalúa la fertilidad de un suelo, se determina la capacidad del mismo para suministrar nutrientes esenciales a la planta. El manejo de la fertilidad del suelo consiste en llevar a cabo prácticas que permiten mantener o mejorar la capacidad del suelo de aportar nutrientes a las plantas, conservando la calidad del suelo y del ambiente. Los mismos autores indican que un nutriente es esencial para la planta cuando la misma sin él no puede completar su ciclo de vida. Su deficiencia solo puede ser corregida con el agregado de ese nutriente y no con el agregado de otro. Además, indican que dentro de los nutrientes esenciales están los macronutrientes; N, P, K, Ca, Mg, y azufre. Por otro lado los micronutrientes: hierro, cobre, zinc, Mn, molibdeno, boro y cloro. Se consideran como nutrientes no esenciales, pero benéficos para el desarrollo de la planta, sodio, silicio, cobalto, aluminio, vanadio (Tisdale y Nelson, 1975).

El N se encuentra en el suelo en un 98% constituyendo estructuras orgánicas y un 10% bajo forma inorgánica: amonio (NH_4), nitrato (NO_3), nitrito (NO_2). El nitrito es un elemento tóxico para las plantas, y el amonio es el elemento que puede encontrarse más fácilmente en suelos forestales. El N constituyendo formas orgánicas no está disponible para las plantas de forma inmediata, ya que las plantas absorberán las formas inorgánicas. El N orgánico a través del proceso de mineralización pasa a formas inorgánicas. Dicha fracción inorgánica tienen corta duración en los suelos. El proceso de mineralización se lleva a cabo por los microorganismos presentes en el suelo. La acción de los microorganismos se verá afectada positiva o negativamente por condiciones ambientales (Tisdale y Nelson, 1975).

El P inorgánico es aquel que se encuentra formando compuestos con hierro, aluminio y Ca dependiendo del pH del suelo. Dichos compuestos son de baja solubilidad lo que trae como consecuencia una baja disponibilidad de P en solución del suelo. Esta situación no ocurre para el caso del N y el K. Una característica particular del P es que los elementos fosfatados inorgánicos aportados por los fertilizantes solubles reaccionan con constituyentes de suelo formando compuestos de baja solubilidad en los suelos. El P total es un elemento que se encuentra a bajas concentraciones en suelo respecto a la concentración de otros nutrientes. El P total en el suelo se encuentra en un 50% bajo forma orgánica y el otro 50% bajo forma inorgánica cuyo origen es la herencia geológica (Tisdale y Nelson, 1975).

En Uruguay los suelos derivados de basamento cristalino, basalto, y de sedimentos devoniano son categorizados como suelos de alto poder de retención de P bajo forma inorgánica (Hernández y Zamalvide, 1998).

El K es uno de los elementos minerales esenciales más abundantes en la corteza terrestre, lo que implica que los suelos heredan los minerales de la geología del lugar por lo tanto los suelos tendrán altas cantidades de dicho elemento. No forma compuestos orgánicos, es decir tiene una dinámica inorgánica. Por ejemplo en los seres vivos se encuentra como ion no asociado a estructuras orgánicas. En el suelo no habrá procesos de mineralización para el K y se encuentra adsorbido a la estructura del suelo. Los suelos tienen abundancia de dicho elemento pero solo un bajo porcentaje está disponible (Tisdale y Nelson, 1975).

Las formas que podemos encontrar al K en el suelo son K en minerales, K no intercambiable, K intercambiable y K en solución. El K mineral se encuentra ubicado conformando la estructura de minerales primarios (feldespatos y micas). Dicha fracción

no se encuentra disponible para las plantas de forma inmediata. El K no intercambiable o fijado representa un 1 a 10% del K, y está ubicado en la intercapa de minerales secundarios como arcillas tipo micas (illitas). Dicha fracción se encuentra escasamente disponible. El K intercambiable se encuentra retenido electrostáticamente debido a la capacidad de intercambio catiónico del suelo. Representa solo un 0,1 a 2% del K total del suelo pero es mucho más importante, en cantidad, que el K que se encuentra en solución del suelo. Se encuentra más fácilmente disponible para las plantas en comparación a los anteriores. El K en solución del suelo representa un 10% del K intercambiable. Se encuentra en la solución del suelo bajo la forma de ion K^+ . Dicha fracción es la que absorben inmediatamente las plantas al establecer contacto la raíz con el suelo. El K en solución está en un equilibrio químico con el K intercambiable (Tisdale y Nelson, 1975).

El contenido de Ca (Ca^{+2}) depende principalmente del material parental, también del contenido de arcilla del suelo debido a que cuanto más complejos de intercambio mas cationes habrá y también de la cantidad de materia orgánica de los suelos. El Ca disponible para las plantas se encuentra en forma intercambiable y en la solución del suelo (Tisdale y Nelson, 1975).

La proporción de Mg como catión intercambiable Mg^{+2} en los suelos es generalmente menor a la de catión Ca intercambiable. El contenido de Mg^{+2} depende principalmente del material parental y del contenido de arcilla y materia orgánica de los suelos (Tisdale y Nelson, 1975).

2.7 CICLO DE NUTRIENTES EN UN ECOSISTEMA FORESTAL

2.7.1 Fundamento

Ramezov, citado por Pritchett (1986) describió la ocurrencia de dos ciclos de nutrientes en los ecosistemas forestales. Uno de los ciclos lo denominó sistema geoquímico externo y al segundo ciclo lo denominó sistema biológico interno. En referencia al ciclo geoquímico, éste autor lo describió como un sistema que cuantifica la exportación e importación de nutrientes del ecosistema forestal. Es decir cuántos nutrientes se van hacia afuera del sistema y cuántos entran al sistema. El ciclo biológico interno lo describió como un sistema donde se considera los intercambios de elementos minerales entre la planta y el suelo.

Switze y Nelson, citados por Pritchett (1986) propusieron que el ciclo biológico descrito por Ramezov se dividiera en dos partes: por un lado, el ciclo que implica el transporte de nutrientes dentro del propio árbol denominado ciclo bioquímico, y el otro ciclo que describa el flujo de nutrientes entre suelo y planta denominado ciclo biogeoquímico. El ciclo bioquímico, es la traslación de nutrientes que se produce desde las hojas (también raíces) viejas o senescentes hacia las hojas jóvenes (desde tejidos viejos a los jóvenes). Antes de caer las hojas senescentes al suelo, la traslación de nutrientes se produce por 2 factores: a) límite crítico de luz; y b) stress hídrico. El biogeoquímico, se refiere a la mineralización que se produce en los restos luego de que éstos caen al suelo. Esta mineralización, para la cual se necesitan relaciones C/N bajas (menores a 20 ó incluso menos) se da por microorganismos, los cuales provocan que esos restos se descompongan e incorporen al horizonte A del suelo, básicamente (Chapin III et al., 2009). En el caso del ciclo geoquímico, las ganancias de nutrientes del ecosistema forestal pueden deberse a partir del polvo y la precipitación pluvial, la alteración de la roca madre, la fijación biológica de N y la fertilización. Lo que refiere a la exportación de nutrientes del sistema, se puede deber a lixiviación y las pérdidas por erosión, las pérdidas por volatilización que ocurre en los incendios y la desnitrificación, y por último salidas de nutrientes a través del proceso de cosecha de madera (Pritchett, 1986).

En los ecosistemas forestales los aportes más importantes de nutrientes provienen de los procesos de alteración de la roca, mineralización de los restos orgánicos y de entradas atmosféricas (deposición por precipitación) y por procesos de fertilización antrópicas (Paré y Van Cleve, citados por Balboa Murias, 2005).

Posteriormente a la cosecha existen potenciales pérdidas de nutrientes de los ecosistemas, generadas por la extracción de fracción de biomasa de los árboles, procesos de erosión y percolación de los suelos debido a la propia actividad antrópica, y la volatilización en caso de quemas de residuos, siendo el primer componente el más importante cuantitativamente (Turner y Lambert, Harvey et al., Judd, Olsson et al., Fox, citados por Balboa Murias, 2005).

2.7.2 Sostenibilidad en la producción

Para una correcta gestión de los ecosistemas forestales es necesario cuantificar el contenido de nutrientes minerales presente en dicho ecosistema mediante el estudio del suelo del sitio, composición de los restos sobre el suelo, las diferentes fracciones de la biomasa arbórea (Balboa Murias, 2005). Conocer la biomasa producida y los nutrientes retenidos en las diferentes fracciones del árbol permite realizar un manejo de las plantaciones forestales más racional (Viera et al., 2012). El estudio sobre la capacidad de exportación, y de la capacidad de reposición de nutrientes del suelo forestal, es un factor importante para mantener la productividad del sitio (Hernández et al., 2009). Ranger et al., Schlatter et al., citados por Balboa Murias (2005) afirman que un ecosistema forestal es estable cuando en el balance nutricional las entradas de nutrientes superan a las salidas de éstos.

Teniendo en cuenta que la actividad forestal se desarrolla sobre suelos de baja fertilidad, la realización de estudios detallados sobre el contenido y concentración de nutrientes sobre la biomasa arbórea es importante para evitar problemas de productividad en rotaciones futuras sobre un mismo sitio (Schumacher y Poggiani, 1993). Cuando se trata de suelos de baja fertilidad, la descomposición de residuos orgánicos derivados de los ecosistemas forestales resulta importante debido que constituye la restitución de nutrientes al suelo (Ouro et al. 2001, González 2008, Hernández et al. 2009). El manejo adecuado de los residuos de los ecosistemas forestales tiene influencia en el balance nutricional y en la tasa de escorrentía superficial. Un balance nutricional positivo en los ecosistemas forestales implica conservar la buena productividad en el largo plazo de los mismos (Balboa Murias, 2005).

Foekel (2005) afirmó que el ciclo de agua, biogeoquímico y ciclo bioquímico se relacionan entre sí y se dan en forma simultánea. Dicho autor citó como ejemplo que ante una situación de déficit hídrico, se verá afectada negativamente la absorción de nutrientes por las plantas, también la translocación de los mismos en las plantas y en el suelo, la descomposición de residuos orgánicos será menor y como consecuencia menor disponibilidad de nutrientes para los árboles en crecimiento.

Hernández et al. (2009) afirmaron que en la producción forestal de Uruguay, ocurre con frecuencia la replantación de los sitios enseguida de la cosecha junto a estrechas rotaciones en años y alta densidad de plantación. Por lo tanto dicho sistema de producción genera una alta demanda de nutrientes al suelo.

Para Schumacher y Caldeira (2001), la capacidad productiva del sitio será mantenida en el largo plazo cuando las pérdidas de nutrientes, dadas por la erosión del suelo y la extracción de fracciones de biomasa durante la cosecha, sean repuestas. Para ello es importante conocer cuanta biomasa es producida en dicho sitio y cuanto es la exportación de nutrientes del ecosistema forestal durante la cosecha.

2.7.3 Dinámica de los nutrientes

En el ecosistema forestal ocurre la dinámica de nutrientes que consiste en que estos pueden ser absorbidos por los árboles y luego ser devueltos al suelo a partir de la descomposición de los residuos. Turvey y Smethurst, citados por Hernández et al. (2009) aseveraron que existen evidencias de que el tipo de suelo afecta la cantidad de nutrientes extraído por los árboles. Hernández et al. (2009) afirmaron que existen diferencias en el retorno de nutrientes al suelo forestal, luego de una cosecha, dependiendo de la especie de *Eucalyptus* que se trate. La cantidad de nutrientes que los *Eucalyptus* extraen del suelo en la producción forestal dependerá de la densidad de plantación, y de la fertilidad del suelo. Esto a su vez determinará la cantidad de biomasa producida y las concentraciones de nutrientes en las diferentes fracciones del árbol (Hernández et al., 2009).

En un ecosistema forestal las fracciones de los árboles que son categorizadas como no comerciables, pueden quedar sobre el suelo y liberar sus nutrientes mediante su descomposición, de esta forma estos se incorporan a la estructura del suelo y son una fuente potencial de nutrientes para la siguiente rotación (García, 2008).

Según Schumacher et al. (2001), las hojas de los árboles presentan una alta concentración de elementos minerales en relación a otras fracciones del árbol, esto es favorable al ciclo de nutrientes en el ecosistema forestal debido a que éstas no son consideradas productos comerciables y luego de la cosecha quedan sobre el sitio.

Santana et al. (1999) afirmaron que, en Brasil, pese a que la corteza representa solo el 10% del tronco del árbol en peso de biomasa, la misma tiene una alta concentración de nutrientes, por lo tanto, si al momento de cosecha esta se deja en el campo la exportación de nutrientes disminuiría y además mejora la sustentabilidad del sistema de producción conjuntamente con una menor fertilización del suelo.

Vaz de Arruda Silveira et al., citados por Hernández et al. (2009) observaron que cuando al momento de cosecha se extrae solo la madera dejando la corteza y el resto de los residuos forestales en el campo, la proporción de nutrientes reciclados será más alta que si se realiza lo contrario.

Los residuos de la cosecha forestal, tienen importancia debido a que a partir de su descomposición generan el retorno al suelo de los nutrientes. Hernández et al. (2009) observaron, en un experimento realizado en la localidad de Algorta (Uruguay) en plantaciones de *Eucalyptus dunnii* Maiden de 9 años de edad, el descenso en la cantidad de biomasa de los residuos forestales (hoja, ramas, corteza) luego de los dos años posteriores a la cosecha. También observaron diferencias significativas en la tasa de descomposición entre los diferentes componentes del residuo de cosecha, exceptuando a ramas y madera no comercial, las cuales no difirieron entre sí. La tasa de descomposición de mantillo fue mayor a la que ocurre en los otros residuos de cosecha. Esto se debe a que la hojarasca se encuentran parcialmente degradadas lo que facilita el ataque microbiano, y también se debe a que las mismas se encuentran en mayor contacto con el suelo lo que implica que se encuentren mas húmedos y tengan más contacto con los microorganismos del suelo.

Berg y McClaugherty, citados por Hernández et al. (2009) afirman que el P y el N formando parte de compuestos orgánicos presentan una dinámica similar en su descomposición debido a que son nutrientes que están muy vinculados a las estructuras orgánicas. Para el caso de aquellos nutrientes que se liberan gradualmente desde el residuo forestal al suelo (P y N), permitirá a los árboles que absorban los elementos minerales de forma más eficiente durante el crecimiento de los mismos (Hernández et al., 2009). El K presenta una libración más rápida desde los residuos de cosecha hacia el suelo. Esto es debido a que el K no es parte de la estructura celular de los compuestos orgánicos y se encuentra de forma iónica (K^+). Dicho nutriente puede ser fácilmente disuelto y removido desde la planta por el agua de la lluvia (O' Connell y Grove, citados por Hernández et al., 2009).

Hernández et al. (2009) observaron incrementos de Ca, Mg y K en forma intercambiable en la superficie del suelo, luego de dos años realizada la cosecha. Según estos autores podría deberse a la liberación de dichos elementos minerales desde los residuos de la cosecha al suelo. También observaron que el K no tuvo incrementos tan altos en suelo como lo tuvieron el Ca y el Mg, lo cual podría deberse, a la lixiviación y acumulación del mismo elemento.

A diferencia del K, el Ca cumple funciones importantes en las células y solo una mínima proporción esta bajo forma de catión libre (Ca^{+2}), según Marschner (2003). Dicha característica tiene como consecuencia una liberación más lenta de dicho elemento de los residuos forestales hacia el suelo. Además, dicho nutriente se encuentra en alta proporción en la corteza de los árboles, que es un residuo de lenta descomposición. Por lo tanto dicho nutriente requiere un mayor tiempo para poder ser liberado y estar disponible para la siguiente rotación, comparado con el K.

Hernández et al. (2009) reportaron que cantidades significativas en kg ha^{-1} de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg) son liberadas por los residuos forestales al suelo luego de dos años realizada la cosecha. Para el caso del K, éste estará disponible en la siguiente replantación, mientras que la disponibilidad de los otros nutrientes para la siguiente replantación es variable. Estos autores reportaron que el nutriente que aparecería mas limitante para futuras plantaciones seria el K, luego de haber comparado la extracción de nutrientes (K, Ca y Mg) por los árboles en una cosecha con la disponibilidad de los mismos en el suelo. La misma conclusión alcanzaron autores como Wise y Pitman (1981), Santana et al. (1999) donde incluyen al Ca junto al K como los primeros nutrientes limitantes hacia una futura replantación. El efecto de descortezar en el sitio reduciría estas limitantes, en particular la de Ca.

2.8 NUTRIENTES EN LOS COMPONENTES DE BIOMASA DE LOS ÁRBOLES

Estudiar el contenido de elementos minerales en los árboles tiene una gran importancia para el manejo adecuado de plantaciones forestales que se llevan a cabo en rotaciones sucesivas. En plantaciones forestales basadas en rotaciones cortas y de altas densidades puede darse una alta producción de biomasa pero a su vez una alta exportación de nutrientes del ecosistema forestal. Las mayores concentraciones de elementos minerales, están en los tejidos que componen la copa del árbol. Mientras que la mayor cantidad de biomasa se encuentra en la madera del tronco, que es el producto deseable para el proceso industrial (González 2008, Giosa 2009, Varela 2009, Hernández et al. 2009, Yussim 2013).

Respecto a las fracciones que componen al árbol, cada una de ellas presenta una concentración de nutrientes diferente. Siguiendo una tendencia de mayor a menor, la cantidad de elementos minerales contenidos en los *Eucalyptus* es: hojas > corteza > ramas > madera del fuste (Schumacher y Poggiani, 1993).

En los árboles, las fracciones que más acumulan nutrientes a lo largo de un turno son las hojas junto a las ramas y en el caso particular de los *Eucalyptus* también será la corteza (García, 2008).

Hernández et al. (2009) observó que la a mayor cantidad de nutrientes fue encontrada en hojas y corteza seguido por ramas. También afirman que los datos de mayor cantidad de nutrientes encontrados en hojas y corteza coincide con otros estudios realizados por otros autores en otros países sobre diferentes especies de *Eucalyptus* e híbridos.

Si bien la biomasa de la corteza y el resto de fracciones no maderables representan un bajo porcentaje sobre el total de biomasa, se da la particularidad que son las fracciones que acumulan mayor concentración de nutriente (por cada unidad de biomasa) en relación a la madera del árbol (González 2008, Giosa 2009, Varela 2009, Hernández et al. 2009, Yussim 2013).

Brañas et al. (2000) coinciden en que las fracciones copa del árbol y corteza son las que presentan mayores concentraciones de elementos minerales.

2.8.1 Concentración de nutriente por fracción vegetal

Brañas et al. (2000) realizaron un ensayo en diferentes sitios de la Coruña (España). La especie que utilizaron fue *Eucalyptus globulus* en plantaciones de 6, 9, 14 y 18 años. Estos obtuvieron como resultado que la madera del fuste, considerando nutriente por unidad de biomasa (mg g^{-1}), es la fracción que tiene menor contenido de elementos minerales, a excepción del contenido de carbono, en comparación a hojas, ramas y corteza. En cuanto a las hojas, estas contenían los porcentajes más altos de los nutrientes N, P y K en comparación a las otras fracciones del árbol. Respecto a la corteza se observó que presenta las mayores concentraciones de Ca y Mg en comparación a las otras fracciones de biomasa que constituyen al árbol. Otros autores, en Huelva, en Portugal sobre *Eucalyptus globulus* y en otras especies de eucalipto obtuvieron resultados similares citados por Brañas et al. (2000).

Brañas et al. (2000) observaron que considerando en conjunto a la corteza, ramas y hojas, se acumulan más de la mitad de la cantidad de N, K, Ca y Mg respecto al total de nutrientes en biomasa aérea producida durante la rotación. En un estudio realizado por Schumacher y Poggiani (1993) en *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus*

grandis Hill ex Maiden, *Eucalyptus torelliana* también observaron que en las hojas es donde se encuentran las mayores proporciones de N, P y K mientras que en la corteza observaron las mayores concentraciones de Ca y Mg.

Schumacher et al. (2001) en *Eucalyptus maidenii*, afirman que pese a que la mayor proporción de biomasa acumulada está en la madera del fuste, esta fracción tiene una menor concentración de nutrientes acumulados respecto a la fracción copa del árbol. Coincidiendo con otros estudios, los autores Viera et al. (2012) en su investigación en *Eucalyptus urophylla* x *E. globulus* de 10 años de edad, observaron que las menores concentraciones (g kg^{-1}) de nutrientes, presentes en la biomasa del árbol, se dan en la madera del fuste pese a que es donde se acumula la mayor proporción de biomasa aérea respecto al total. También coinciden en que la corteza presenta las mayores concentraciones de Ca y Mg. Además, observaron que el zinc también se encuentra en elevada concentración. Estos autores afirman que para los demás nutrientes a excepción de los nombrados, las mayores concentraciones se dan en hojas.

González (2008) en su estudio realizado en Soriano y Rio Negro en Uruguay, sobre *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus maidenii* de 10 años de edad, observó que en la madera del fuste del árbol se dan las menores concentraciones (expresada en g kg^{-1}) para todos los nutrientes. También observó que las hojas presentan las mayores cantidades de N y P en comparación a otras fracciones del árbol analizadas. Para el caso de la corteza, esta presenta las mayores concentraciones de Mg, Ca y K. Para el caso del K observó que para dicho elemento se dan similares concentraciones en las diferentes fracciones del árbol estudiado.

Según Hernández et al. (2009) de todos los residuos de la cosecha, las hojas presentan las mayores cantidades de N, P y K, en tanto que la corteza también presenta altas concentraciones de nutrientes, particularmente de Ca. El Mg presentó menor variación a lo largo de los diferentes componentes del árbol. El P también presentó escasa variación, pero se encontró altas concentraciones especialmente en las hojas. Para el caso del Ca, observaron que presentó las mayores variaciones en su concentración en los diferentes componentes (Hernández et al., 2009).

2.8.2 Cantidad de nutrientes absorbidos por plantaciones de *Eucalyptus*

La extracción se fundamenta por la cantidad de nutriente por unidad de biomasa en función de la densidad de plantación.

Schumacher y Caldeira (2001) en *Eucalyptus maidenii* también observaron que en el total de biomasa del árbol, la magnitud en las cantidades de elementos minerales contenidos en los árboles fueron $\text{Ca} > \text{N} > \text{K} > \text{Mg} > \text{P}$. Estos resultados también los observó Freitas (2000) en *Eucalyptus grandis* de 9 años de edad.

Según Schumacher et al. (2011) las cantidades de macronutrientes acumulados, en el total de biomasa aérea producida, en *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* fueron; $\text{Ca} > \text{N} > \text{K} > \text{Mg} > \text{P} > \text{S}$. Para el caso de los micronutrientes las cantidades de nutrientes en el total de biomasa aérea es la siguiente; $\text{Mn} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Cu}$.

González (2008) analizando las cantidades totales absorbidas de nutrientes presentes en la biomasa aérea (hojas, ramas, corteza y madera del fuste) de los árboles *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus maidenii*, obtuvo como resultado, para los diferentes elementos minerales analizados, el Ca fue el más absorbido ya que fue el que presentó mayor cantidad en la biomasa total aérea en ambas especies (algo más de 760 kg ha^{-1} en *E. globulus* y 1939 kg ha^{-1} en *E. maidenii*). En su investigación la secuencia de nutrientes absorbidos por la parte aérea de la biomasa arbórea fue $\text{Ca} > \text{K} > \text{N} > \text{Mg} > \text{P}$. Los porcentajes obtenidos para dicha secuencia fueron: 65%, 15%, 12%, 7% y 1%.

Hernández et al. (2009) en *Eucalyptus dunnii* observó una diferencia con respecto a González (2008) en el nivel de extracción de N comparado al K, observando esta secuencia: $\text{Ca} > \text{N} > \text{K} > \text{Mg} > \text{P}$. En *E. dunnii* se observó una absorción total de Ca de 1851 kg ha^{-1} . Los porcentajes obtenidos para dicha secuencia fueron: 54%, 18%, 17%, 9%, 2%.

Yussim (2013) en *Eucalyptus dunnii* obtuvo resultados coincidentes en cuanto a que el nutriente más absorbido por la biomasa aérea fue Ca y el menos fue P.

Giosa (2009) en *Eucalyptus grandis* y Varela (2009) en *Eucalyptus globulus* estudiaron la extracción de nutrientes pero considerando solamente el fuste del árbol, y obtuvieron como resultado el siguiente orden de extracción: $\text{Ca} > \text{N} > \text{K} > \text{Mg} > \text{P}$.

2.8.3 Factores que determinan el contenido de nutrientes en el árbol

Según estudios de diferentes autores, existen varios factores que van a determinar el contenido de nutrientes en los árboles. Dentro de los factores nombrados estos son, la especie del árbol, la disponibilidad de nutrientes del suelo, edad del árbol y el tipo de nutriente estudiado.

Los requerimientos de nutrientes son variables de acuerdo a las especie. Las concentraciones de nutrientes presentes en los árboles dependerán de la disponibilidad de elementos minerales presentes en los suelos (Waring y Schelesinger, citados por Schumacher y Poggiani, 1993).

En Brasil, estudios sobre *Eucalyptus grandis* observaron que el contenido de nutrientes minerales en las hojas varía en función de la edad y las estaciones, según Bellote y Ferreira (1995).

Schumacher et al. (1993) afirman que la acumulación de elementos minerales en las diferentes fracciones de la biomasa aérea del árbol varía en función del tipo de mineral que se estudie, de los requerimientos nutricionales de cada especie, de la fertilidad del suelo del sitio donde esté la plantación y de la edad de los árboles. Schumacher et al. (1993) observaron que *Eucalyptus grandis* tuvo una elevada productividad, lo que implicó una remoción más alta de nutrientes del suelo.

Campos Santana et al., citados por Varela (2009), quienes estudiaron el contenido de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus*, y observaron que a medida que el suelo era más productivo, se encontró mayor cantidad de nutrientes en la madera del árbol en comparación a un sitio de más baja productividad.

2.9 EXPORTACIÓN DE NUTRIENTES DEL ECOSISTEMA FORESTAL

La exportación de nutrientes será en función de la intensidad de la cosecha en la plantación forestal (Schumacher et al., 2011).

En un estudio realizado en Coruña y Pontevedra, España por Balboa Murias (2005) con *Eucalyptus globulus*, *Pinus pinaster* y *Quercus robur*, observó que al realizar la extracción de madera sin corteza, se exporta del ecosistema forestal un 37 a 57% de

los nutrientes mas limitantes como N, P, Ca y Mg contenidos en la biomasa total. Si la extracción es madera y también corteza, se exportara 71 a 75 % de dichos elementos. Dicho incremento se da porque aumenta significativamente la extracción de Ca y Mg, dada su alta concentración en la corteza del árbol. En el caso que la extracción se madera, corteza y ramas, se estará exportando el 90 % de los elementos minerales almacenados en los árboles.

González (2008), encontró que el Ca es el elemento mineral que se encuentra con mayor concentración en el árbol respecto al total de los otros nutrientes. Pese a esto, cuando el fin productivo es extracción de madera del fuste sin corteza, solo se exportara del ecosistema forestal un 18,2% del total del Ca. El resto del Ca permanecerá en los residuos derivados de la cosecha forestal. Este autor reporta que para el P, es el que se encuentra en menor cantidad dentro del árbol, pero a su vez es el que mayor se exportará luego de la cosecha de madera del fuste sin corteza. Exportándose un 45% del total del P presente en el árbol. Luego del P, los porcentajes de exportación de nutrientes respecto al total de elementos minerales en el árbol al realizar la cosecha de madera del fuste sin corteza, serán el Mg (33 %), N (32 %), K (19 %) y Ca (18 %).

Hernández et al. (2009) afirman que en una plantación de *Eucalyptus dunnii*, en donde madera comercial sin corteza representa el 60% de la biomasa total aérea, la exportación de nutrientes no supera el 50% del total de estos contenidos en la parte aérea. Según estos autores cuando ocurre la cosecha de madera comercial, y esta es retirada del sitio dejando la corteza en el campo, solo se exportara el 27% del N, 35% del P, 18% del K, 16% del Ca y 41% del Mg (siendo el que más se exporta) presente en el bosque forestal. La proporción restante de los nutrientes quedara en el sitio, formando parte de los residuos de cosecha. Sin embargo, cuando en la cosecha no se realiza el descortezado, la exportación de nutrientes del sitio se incrementara a 41%, 55%, 46%, 68% y 66% respectivamente de N, P, K, Ca y Mg. El nutriente que más se encontró en la biomasa aérea del árbol fue el Ca representando 1500 kg ha^{-1} , pero solo un 16 % será exportado, luego de la cosecha sin corteza (Hernández et al., 2009).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

Se realizaron las evaluaciones en cuatro rodales comerciales de *Eucalyptus globulus* de diferentes edades (5, 7, 9 y 12 años) de la Empresa REDALCO, ubicados en el departamento de Rocha. La ubicación de tres de los cuatro sitios (Cerro Molina, Pololo 1 y Talayer), se encuentra en una zona delimitada por las rutas No. 9, No. 13, No. 15 y No. 16, aproximadamente a 30 km de distancia de los centros poblados Castillos y Velázquez. El sitio El Canelón, se encuentra aproximadamente a 10 km de la ciudad de Rocha, entre las rutas No. 9, No. 109 y camino vecinal Sainz Martínez. (Figura No. 1). En dicha ubicación de los sitios experimentales, de acuerdo a las aéreas de enumeración de SICA (MGAP. DIEA, 2000), el uso de suelo que predomina es de campo natural (76%), seguido en segundo orden por bosques naturales (4,6%) y en cuarto lugar se da el uso para forestación de especies no nativas, representando un 4,4% según hectáreas utilizadas. Dentro de dichas aéreas de enumeración SICA 2000, existen 4.338 hectáreas destinadas a la utilización con especies arbóreas exóticas de las cuales el 99,2% de las mismas fueron utilizadas con diferentes especies del genero *Eucalyptus*. El Sistema de Información del Censo Agropecuario (SICA) es una herramienta informática diseñada para el manejo interactivo de la información del Censo General Agropecuario 2000.

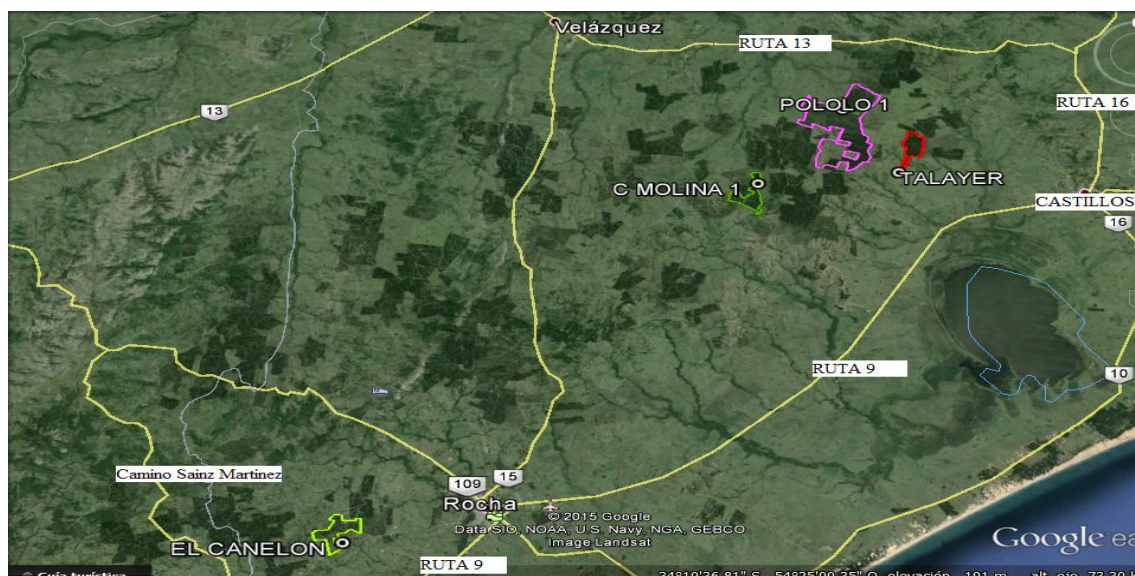


Figura No.1. Ubicación de los sitios experimentales en la zona. Fuente: Google Earth (2015)

3.2 CARACTERIZACIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL

3.2.1 Clima

Según la Dirección Nacional de Meteorología, en la estación meteorológica de la ciudad de Rocha (Latitud: 34°29,6'S; Longitud: 54°18,7'W Altitud: 18,16 m) la temperatura media anual es de 16,1°C, la temperatura máxima media anual es de 21,5°C y la mínima media anual de 10,8°C. En esta zona se registran precipitaciones anuales de 1122mm en promedio.

3.2.2 Suelos

3.2.2.1 Grupos CONEAT del sitio experimental

De acuerdo a la ubicación de los sitios experimentales, a través del mapa CONEAT, se puede observar que los mismos se encuentran sobre grupos CONEAT 2.11a y 2.12 (Figura No. 2 y No. 3).

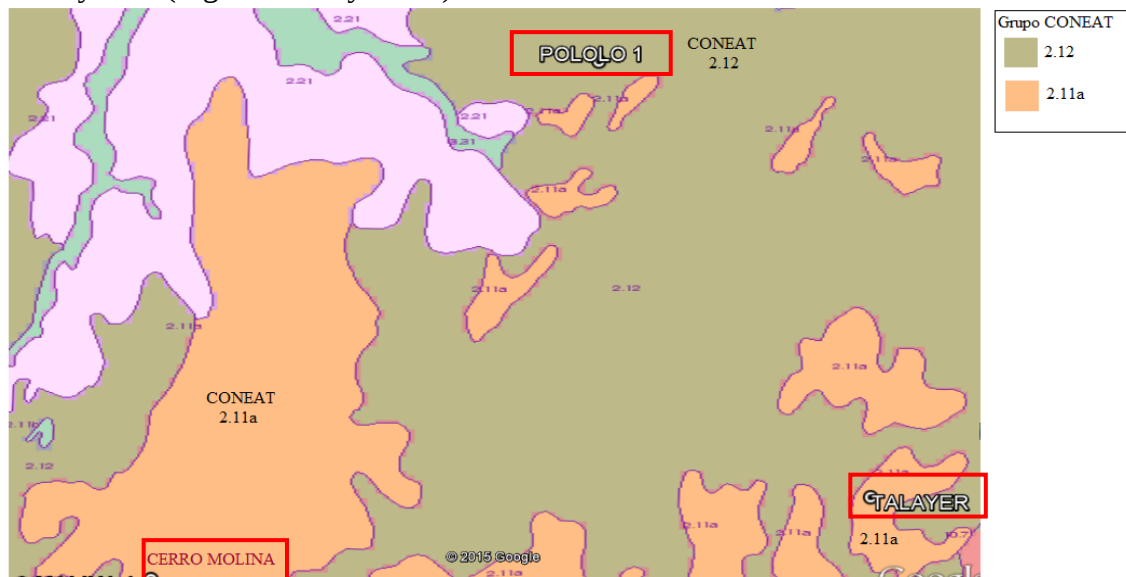


Figura No. 2. Mapa CONEAT de sitios Pololo 1, Cerro Molina y Talayer. Fuente: MAP. CONEAT (1979), MGAP. RENARE (2014), Google Earth (2015).

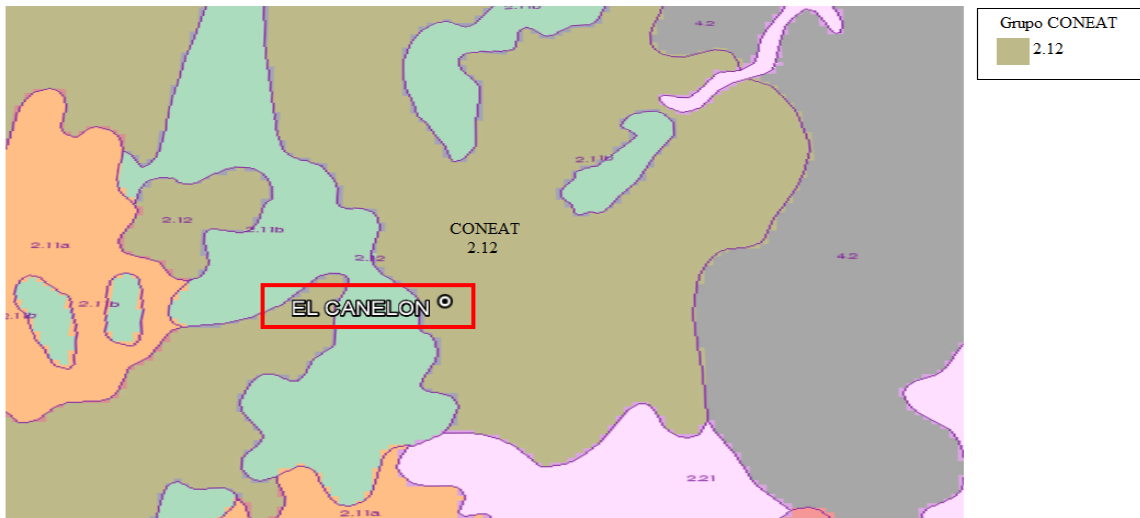


Figura No. 3. Mapa CONEAT del sitio El Canelón. Fuente: MAP. CONEAT (1979), MGAP. RENARE (2014), Google Earth (2015).

Características del Grupo CONEAT 2.11a

Son sierras rocosas con paisaje ondulado fuerte y pendientes entre 5 y 20%. Los materiales geológicos están constituidos básicamente por rocas ígneas, metamórficas y algunas efusivas ácidas, y la rocosidad puede alcanzar niveles de hasta el 10%. En este grupo, deben establecerse dos regiones (sur y norte) con asociaciones de suelos diferentes: La región sur (Dptos. de Lavalleja, Maldonado, Rocha y parte de Treinta y Tres) donde los suelos dominantes son Brunosoles Subéutricos Háplicos, arenoso franco gravillosos y franco gravillosos, superficiales, pedregosos (Regosoles). Asociados a éstos, ocurren Brunosoles Subéutricos Típicos, francos, moderadamente profundos, a veces profundos (Praderas Pardas moderadamente profundas), y Litosoles Subéutricos Melánicos, areno gravillosos, a veces pedregosos y muy superficiales; con afloramientos rocosos. Los Brunosoles (Háplicos y Típicos) ocupan en conjunto más del 70% del área y se desarrollan entre los afloramientos de rocas fundamentalmente migmatitas y granitos intrusivos, en tanto que los Litosoles ocurren próximos a los afloramientos, o en las áreas más rocosas de la unidad (MAP.CONEAT, 1979).

La región norte (Dptos. de Cerro Largo y norte de Treinta y Tres) los suelos dominantes son Inceptisoles Úmbricos y asociados a éstos, existen Litosoles Dístricos, Úmbricos (MAP.CONEAT, 1979).

La vegetación es pradera de ciclo estival y matorrales asociados, y el uso es pastoril. Esta unidad ocupa áreas importantes de la Sierra de los Ríos, extensas zonas entre Valentines, Tupambaé y Treinta y Tres, alrededores de Aiguá, etc. Los suelos son

integrantes de la unidad Santa Clara y parte de la unidad Sierra de Aiguá de la carta a escala 1:1.000.000 (MAP-D.S.F.). Índice de Productividad 53 (MAP. CONEAT, 1979).

Características del Grupo CONEAT 2.12

Son sierras no rocosas de relieve ondulado y ondulado fuerte, con afloramientos en general menores de 5% y pendientes variables entre 5 y 15%. Los suelos son Brunosoles Subéutricos Háplicos y Típicos, arenoso francos y francos, algunas veces arenosos franco gravillosos, superficiales y moderadamente profundos (Regosoles y Praderas Pardas medias poco profundas). Asociados a éstos, se encuentran Litosoles Subéutricos Melánicos, arenoso franco gravillosos, a veces muy superficiales y pedregosos y Brunosoles Subéutricos Lúvicos (Praderas Pardas máximas), francos u ocasionalmente arenoso-francos, a veces ródcos (Praderas Rojas). La vegetación es de pradera de ciclo predominantemente estival, a veces con matorral y monte serrano asociado, en general en las gargantas y zonas cóncavas. El uso actual es pastoril. Ocupa grandes extensiones en los Dptos. de Maldonado, Lavalleja, oeste de Treinta y Tres y suroeste de Cerro Largo. Los suelos de este grupo forman parte de la unidad Sierra de Polanco de la carta a escala 1:1.000.000 (MAP-D.S.F.). Índice de Productividad 83 (MAP. CONEAT, 1979).

3.2.2.2 Características de los suelos de los rodales evaluados

El relieve general de la zona corresponde a sierras no rocosas, con escasos afloramientos, siendo el material de origen filitas del Terreno Cuchilla de Dionisio con intrusiones de cuarzo. Debido a la presencia de filitas, podría deducirse que dicho sitios experimentales forman parte de la formación Rocha (Bossi, 2007). El relieve local donde se realizaron las determinaciones fueron en todos los casos laderas medias, entre 10 y 20% de pendiente, excepto en Pololo 1 donde fueron laderas altas de 5% de pendiente.

Se realizó la descripción de los sitios experimentales mediante taladro Edelman. Los suelos de los sitios experimentales se desarrollaron a partir de la alteración de filitas del Terreno Cuchilla Dionisio, como ya fue mencionado. En términos generales presentan un horizonte A de 23 a 33 cm de espesor, de textura franca a franco limosa, con presencia común de gravilla y gravas de cuarzo. Estas últimas predominan hacia la base del horizonte A. Los colores de dicho horizonte son pardos a pardo oscuros. En los sitios Pololo 1 y Talayer, luego del horizonte A hay una transición clara hacia un

horizonte C de textura franco arcillo arenosa a arcillo arenosa. En los sitios El Canelón y Cerro Molina, luego del horizonte A ocurre un horizonte Bt de 58 a 66 cm, respectivamente, de textura arcillosa. En dicho horizonte se da la presencia de moteados rojos comunes y abundantes. En el Apéndice se indican las características de cada sitio, una descripción morfológica del perfil modal, y los datos analíticos correspondientes.

3.2.3 Características de los sitios experimentales

En el Cuadro No. 3 se describen las características generales referidas al CONEAT, topografía y dasométricas correspondientes a los sitios experimentales.

Cuadro No. 3. Información de cada parcela experimental sobre tipo de suelo, relieve local, DAP, altura y ubicación geográfica.

Parcela experimental	El Canelón	Talayer	Pololo 1	Cerro Molina
Grupo CONEAT	2.12	2.11a	2.12	2.11a
Año de plantación	2009	2007	2005	2002
DAP (cm)	13.6	17.35	17.06	20.82
Altura (m)	11.82	18.12	21.02	25.64
Ubicación geográfica	34°30'30''S 54°26'12''O	34°10'49''S 54°00'21''O	34°07'11''S 54°02'53''O	34°11'29''S 54°07'07''O

3.3 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN

3.3.1 Selección de sitios

En primera instancia se procedió a realizar una fotointerpretación en base a fotografía aérea del sitio con el fin de seleccionar potenciales sitios que sean homogéneos en el tipo de suelo y estén ocupados por rodales de *Eucalyptus globulus*. Una vez seleccionado los potenciales sitios, se procedió a ir al campo para poder caracterizar los suelos de cada uno de los sitios preseleccionados. Durante la salida de campo, se realizó la descripción de los perfiles de suelo obtenidos en base a caracteres morfológicos.

3.3.2 Análisis de suelos

Una vez realizado la descripción en base a caracteres morfológicos, se procedió a coleccionar muestras de cada uno de los horizontes identificados. Las muestras de suelo, previo análisis químico, fueron secadas a estufa por 48 horas a 40°C y molidas hasta un tamaño menor a 2 mm.

Se realizó la determinación potenciométrica de pH (en agua y KCl 1M) con una relación suelo solución v/v 1:2.5. El carbono orgánico fue determinado mediante oxidación por vía húmeda (método Walkley y Black). El P asimilable fue determinado por el método Bray-1. La extracción de Ca, Mg, K y Na se realizó con acetato de amonio 1 M buffereado a pH 7 y luego se determinó Ca y Mg por espectrofotometría de absorción atómica y K y Na por espectrofotometría de emisión.

En base a estos datos analíticos, y datos de descripción morfológica de los perfiles de suelo se pudo seleccionar los sitios con el objetivo de obtener parcelas experimentales homogéneas en cuanto al tipo de suelo donde estaban creciendo los árboles.

3.3.3 Cosecha y análisis de las fracciones vegetales

Los rodales evaluados pertenecen a la empresa Redalco S.A. Se seleccionaron cuatro sitios experimentales ocupados por plantaciones de 5, 7, 9 y 12 años de *Eucalyptus globulus*. La cosecha se realizó el 8 de diciembre del 2014.

Se procedió a localizar parcelas de inventario en los sitios seleccionados en base a suelos similares con el uso de GPS, y una vez en el sitio, se seleccionaron nueve árboles aledaños a la parcela de inventario, con valores similares de DAP al promedio de la parcela, así como también con buen estado sanitario. Los árboles fueron apeados, determinando la altura total, y seccionándolos en trozas de 2,5 metros cada una, las cuales fueron pesadas. De cada árbol apeado, se cortó un disco de la troza basal del fuste, y otro disco a la altura de 7,20 m de altura, a los efectos de calcular la relación madera/corteza. También se obtuvieron ramas finas (diámetro < 1 cm) y gruesas (diámetro > 1 cm). Por último se colectaron hojas de diferentes partes de la copa del árbol.

En cada sitio experimental, en uno de los nueve árboles, se separaron las tres fracciones: hojas, ramas finas y ramas gruesas. El fin fue tomar el peso de cada componente por separado, para estimar la proporción que representaba en la biomasa aérea.

Una vez colectadas las muestras de los árboles apeados, estas se llevaron a laboratorio de suelos de Facultad de Agronomía. En el laboratorio, se pesó cada una de las muestras colectadas (discos, corteza, hojas, ramas finas y gruesas) con el fin de obtener peso fresco. Luego esas muestras fueron secadas en estufa a 60°C hasta llevarlas a peso constante. Luego se tomó la masa de dichas muestras con el fin de obtener peso seco y las muestras fueron molidas para realizar los análisis químicos.

La determinación de P, Ca, Mg y K consistió en la calcinación de la muestra a 550°C durante 5 hs y posterior disolución de las cenizas con HCl al 20%. En el extracto se determinó P por colorimetría, Ca y Mg por espectrofotometría de absorción atómica y K por espectrofotometría de emisión. La determinación de N total se realizó en una digestión de 0.5 g de muestra con ácido sulfúrico y catalizador, determinando los contenidos totales de N (N) por el método de Kjeldahl.

3.4 CÁLCULOS REALIZADOS

Mediante el dato de peso seco y fresco de las diferentes fracciones y densidad de plantación se calculó porcentaje de materia seca, proporción de la fracción en el total de residuos y biomasa. Con el análisis químico para cada nutriente se obtuvieron las concentraciones (g kg^{-1}) según la fracción vegetal analizada. Estos datos se utilizaron para calcular la cantidad de nutrientes extraídos por las diferentes fracciones en kg ha^{-1} . También se calcularon los valores de Incremento Medio Anual (IMA) e Incremento Corriente Anual (ICA) considerando la edad de los cuatro rodales de *Eucalyptus globulus* estudiados y el volumen en metros cúbicos producido por estos.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS DE LOS SITIOS EVALUADOS

4.1.1 Propiedades químicas de los suelos de cada sitio experimental

El Cuadro No. 4 muestra las propiedades químicas de los suelos correspondientes a los sitios experimentales. No se han agregado los horizontes C. La descripción detallada de los perfiles se presenta en el apéndice.

Cuadro No. 4. Valores de las propiedades químicas para los suelos correspondientes a los sitios estudiados.

Parcela	Horiz .	Prof.	COS †	pH (H ₂ O)	Ca	Mg	K	Na	A.I.	BT	CIC	%SB
		Cm	g kg ⁻¹		----- cmol _c kg ⁻¹ -----							%
					--							
El Canelón	Ap	0 - 10	18,9	4,57	2,05	1,17	0,50	0,48	0,99	4,20	5,19	80,9
	A	10 - 30	23,7	4,60	2,57	1,25	0,56	0,45	0,91	4,83	5,74	84,1
	Bt	30 - 47	11,1	4,91	3,22	3,07	0,65	0,49	1,24	7,43	8,67	85,6
	BC	47 - 88	3,1	4,86	1,84	1,94	0,27	0,43	1,86	4,48	6,34	70,7
Talayer	Ap	0 - 15	26,3	4,36	2,97	2,29	0,37	0,51	2,17	6,14	8,31	73,9
	A	15 - 30	22,3	4,58	3,3	2,02	0,32	0,55	2,15	6,19	8,34	74,2
Pololo 1	Ap	0 - 14	30,3	5,65	2,04	1,90	0,39	0,43	0,14	4,76	4,90	97,1
	A	14 - 27	10,6	4,73	4,81	2,17	0,38	0,44	1,06	7,80	8,86	88,0
	AC	27 - 44	6,7	4,72	3,31	1,97	0,38	0,52	1,72	6,18	7,90	78,2
C° Molina	Ap	0 - 18	34,5	4,00	3,11	0,50	0,43	0,34	1,92	4,38	6,30	69,6
	A	18 - 33	23,6	3,96	1,27	0,40	0,31	0,35	2,46	2,33	4,79	48,6
	Bt1	33 - 63	12,1	4,08	1,22	1,10	0,56	0,70	3,79	3,58	7,37	48,6
	Bt2	63 - 99	3,9	4,08	0,74	0,55	0,34	0,63	3,63	2,26	5,89	38,4
	BC	99 - 120	2,2	4,11	0,59	0,46	0,30	0,40	4,60	1,75	6,35	27,6

† COS: Carbono orgánico del suelo; A.I.: Acidez Intercambiable; B.T.: Bases Totales; C.I.C.: Capacidad de Intercambio Catiónico a pH del suelo; S.B.: Saturación en Bases

Presentan en general un alto contenido de materia orgánica, observándose valores bajos de pH y elevados valores de acidez intercambiable.

Respecto al contenido de carbono orgánico, en este trabajo se obtuvieron valores mayores a los observados por Varela (2009), en suelos de grupo CONEAT 2 sobre basamento cristalino en el este del país y a los observados por Giosa (2009) en suelos del oeste del país, grupo CONEAT 9 y 09.

Los valores de acidez intercambiable y de pH, de este estudio, son comparables a los observados por Varela (2009) en los suelos bajo monte de *Eucalyptus globulus* en el este del país. En cambio, en el trabajo de Giosa (2009) realizado en suelos del litoral oeste, comparativamente a los de este trabajo, presentan valores de pH un poco más elevados pero a su vez presentan acidez intercambiable en cantidades apreciables.

Estos suelos presentan relativamente altos niveles de bases, considerando que están sobre basamento cristalino, en especial para el caso del K intercambiable. Específicamente para el Ca intercambiable, estos valores son altos comparativamente a suelos ubicados en la zona de Tacuarembó, pero también son valores más bajos a lo que se puede encontrar en los suelos agrícolas del litoral oeste. Comparativamente, se encontraron valores similares a los de Varela (2009) cuyo estudio es cercano al sitio de este estudio. Pero se observaron valores menores a los encontrados por Giosa (2009), aunque en dicho trabajo se observó grandes diferencias entre suelos.

4.2 PRODUCCIÓN DE BIOMASA

4.2.1 Producción de biomasa total por edad

Cuadro No. 5. Biomasa total producida según edad y densidad de plantación en cuatro rodales de *Eucalyptus globulus*

Parcela	Grupo CONEAT	Edad	Densidad	Biomasa total	Biomasa total
		Años	Árboles ha ⁻¹	Mg árbol ⁻¹	Mg ha ⁻¹
El Canelón	2.12	5	1050	0,0573	60
Talayer	2.11a	7	950	0,1288	122
Pololo 1	2.12	9	1350	0,1338	181
Cerro Molina	2.11a	12	1350	0,2181	295

Se observa (Cuadro No. 5) la producción de biomasa total (considerando todas las fracciones vegetales aéreas de los árboles) para cada sitio experimental. Se destaca que a medida que los árboles tienen más edad la producción de biomasa total aumenta.

Para la biomasa total por árbol se observan valores similares a los 7 y 9 años de edad. Este comportamiento se podría explicar debido a que en el sitio de 7 años cada árbol dispone de 10,5 m² para crecer mientras en el sitio de los 9 años, cada árbol dispone de 7,5 m². Lo que implica que en Talayer los árboles tienen menos efecto de competencia entre sí, y además más oportunidad de aprovechamiento de recursos que favorecen su crecimiento.

González (2008) observó en su ensayo que la biomasa total a los 10 años de una plantación de *E. globulus* fue de 137,5 Mg ha⁻¹. En otra especie como *Eucalyptus dunnii* en el litoral oeste del Uruguay, Hernández et al. (2009) obtuvo como resultado una producción de 236 Mg ha⁻¹. Yussim (2013) para *Eucalyptus dunnii* de 12 años en litoral oeste obtuvo como resultado una biomasa total de 238 Mg ha⁻¹. Por lo tanto los sitios de 9 y 12 años de nuestro estudio se encuentran en el extremo superior de la serie de datos, indicando que tuvieron buenas condiciones para el crecimiento.

4.2.2 Datos dasométricos

Cuadro No. 6. Datos dasométricos en cuatro rodales de *Eucalyptus globulus*

Edad	Densidad	DAP	Altura	Vol	Vol	IMA	ICA
	Árboles ha ⁻¹	cm	m	m ³ /árbol	m ³ ha ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹	m ³ ha ⁻¹
5	1050	13,6	11,8	0,060	63,1	12,6	-
7	950	17,4	18,1	0,150	142,4	20,3	39,7
9	1350	1,1	21,0	0,168	227,0	25,2	42,3
12	1350	20,8	25,6	0,306	412,4	34,4	61,8

IMA= Incremento Medio Anual, ICA= Incremento Corriente Anual

El Cuadro No. 6 presenta valores dasométricos de los rodales ubicados en los sitios experimentales. Se observa particularmente que para el caso del sitio de 12 años de edad, un valor muy alto de IMA m³ ha⁻¹ año⁻¹ y de ICA, lo que implica un excelente crecimiento para la especie *Eucalyptus globulus* en el este del país.

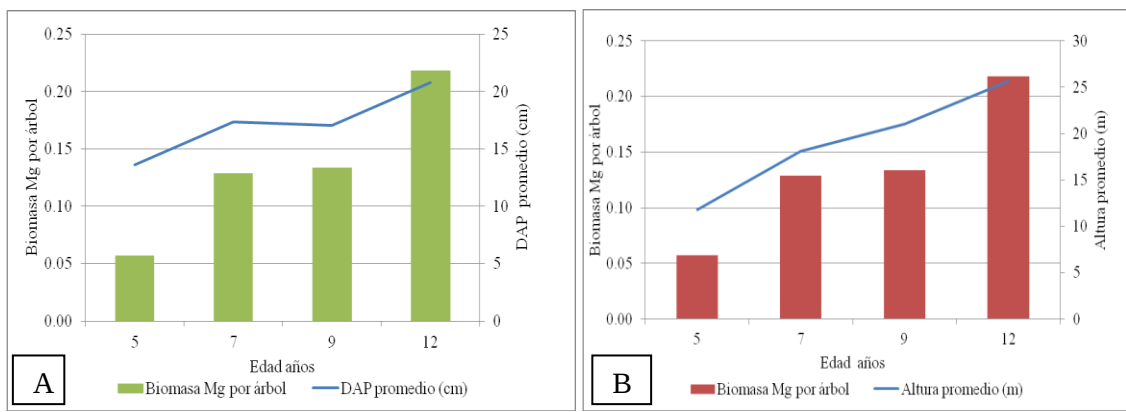


Figura No. 4. A) DAP y biomasa por árbol en función de la edad de los árboles. B) altura y biomasa por árbol en función de la edad de los árboles para cuatro rodales de *Eucalyptus globulus*.

En los graficos A y B de la Figura No. 4 se muestra que un mayor DAP y altura, determinan una mayor producción de biomasa total por árbol.

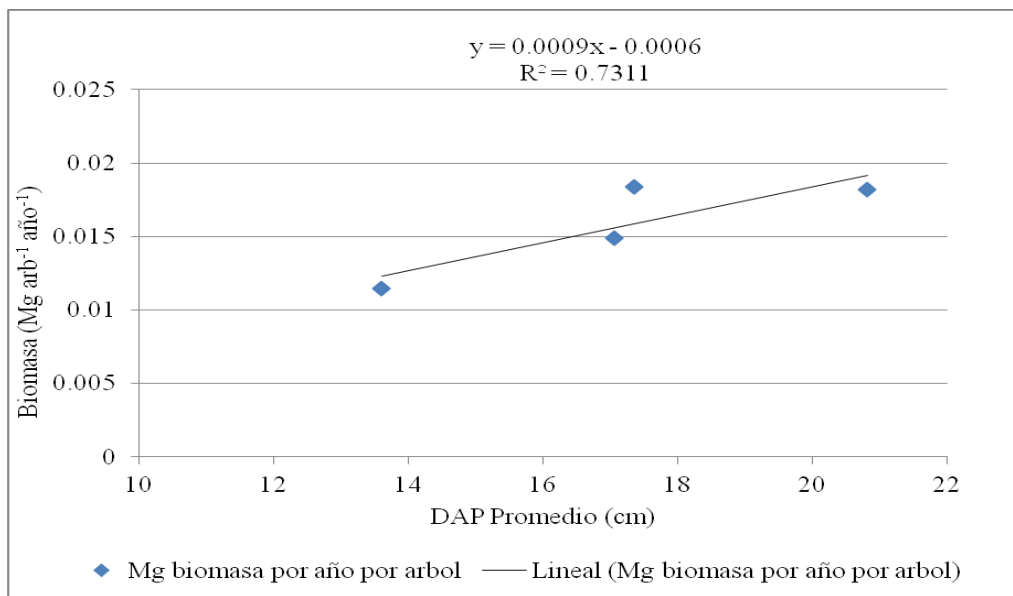


Figura No. 5. Relación entre la producción promedio por año de biomasa por árbol de *E. globulus* y el DAP para las parcelas evaluadas.

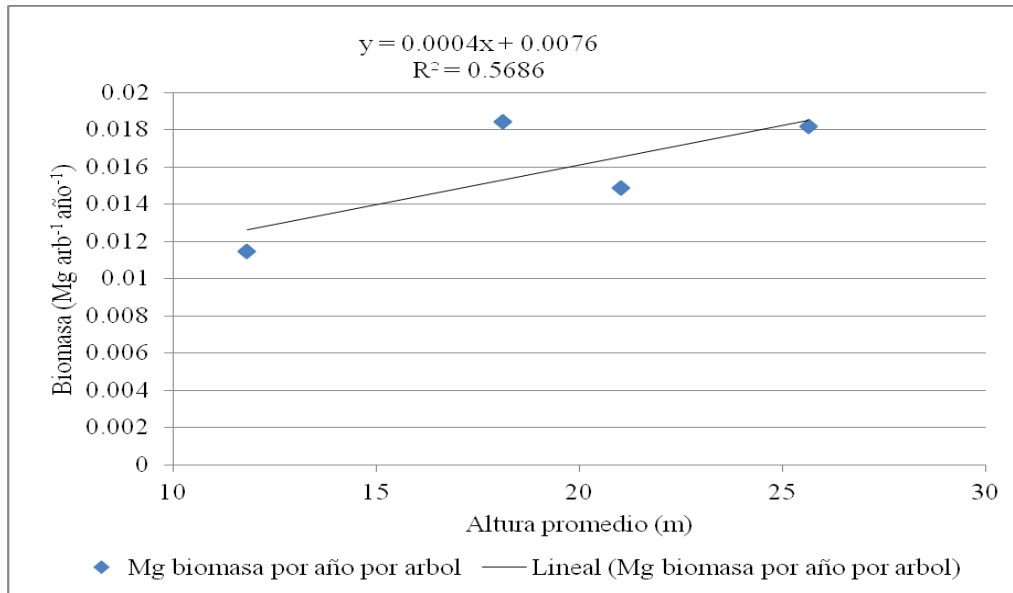


Figura No. 6. Relación entre la producción promedio por año de biomasa por árbol de *E.globulus* y altura para las parcelas evaluadas.

En los Figuras No. 5 y 6 se puede observar que existe una correlacion positiva entre DAP y altura, con la biomasa producida por árbol y por año.

Comparativamente a otros trabajos relizados, refiriendonos al DAP, este estudio mostró un valor de R^2 menor ($R^2=0.73$) a los observados por Varela (2009) en *Eucalyptus globulus* donde obtuvo $R^2=0.83$ y Yussim (2013) un $R^2=0.80$ en *Eucalyptus dunnii*. Dicho valor es menor, debido a que en el sitio Talayer (rodal de 7 años) tenia una menor densidad respecto a los otros sitios estudiados en nuestro trabajo, lo que alteraria la correlación entre DAP y biomasa producida por árbol.

Los valores de R^2 relacionados a la altura y biomasa producida, en este trabajo el valor que observamos fue menor ($R^2=0.56$) al obtenido por Varela (2009), el cual obtuvo $R^2=0.82$, sin embargo obtuvimos valores mayores a los de Giosa (2009), $R^2=0.30$ en *Eucalyptus grandis*, y Yussim (2013), $R^2=0.42$.

Los coeficientes de las ecuaciones ajustadas pars el caso de Giosa (2009) no son comparables, ya que en ese trabajo se ajustó con el valor de biomasa total a cosecha. Varela obtuvo un menor valor del coeficiente de regresión para DAP ($y = 0.0002x - 0,0249$) y un mayor valor para altura ($y = 0.0010x - 0,0033$). También los valores de este estudio difieren de los reportados por Yussim (DAP: $y = 0.002x - 0.02$; Altura: $y = 0.0006x + 0.0015$). Probablemente las discrepancias entre los diferentes trabajos tienen

relación con la diferente arquitectura de los árboles, que depende no solo de la edad, sino también de la densidad del rodal (Laclau et al., 2000).

4.2.3 Proporción de la distribución de biomasa en cada fracción vegetal por edad

Cuadro No. 7. Proporción de biomasa producida en cada fracción del árbol y rendimiento según fracción del árbol, en función de la edad del mismo para cuatro rodales de *Eucalyptus globulus*.

Edad	Proporción de biomasa según fracción (%)				
	Madera	Corteza	Hojas	Ramas gruesas	Ramas finas
	(%)				
5	73	10	7	6	4
7	70	12	7	6	6
9	77	10	5	3	4
12	79	10	3	5	3
	Rendimiento según fracción (Mg ha ⁻¹)				
5	44,1	6,2	4,0	3,5	2,3
7	85,1	14,4	8,5	7,4	6,9
9	139,4	18,9	9,3	6,2	6,9
12	231,2	30,6	8,3	16,2	8,2

En el Cuadro No. 7 se puede observar que en los sitios de 9 y 12 años la proporción de producción de biomasa en madera respecto al total presenta valores típicos para la especie *Eucalyptus globulus* entre 9 y 12 años de edad en Uruguay, siendo ente 77% y 79%. En cambio en los sitios de 5 y 7 años la proporción de madera es menor. González (2008) observó en *Eucalyptus globulus* de 10 años de edad en litoral oeste del Uruguay, una proporción de madera de 77% y 23 % para los restos, respecto al total de biomasa aérea producida. Según bibliografía analizada (González 2008, Hernández et al. 2009, Viera et al. 2012, Yussim 2013) los valores habituales de proporción de biomasa en madera y restos, para cosecha en el género *Eucalyptus*, es en promedio de 70% y 30% respectivamente.

La proporción de biomasa observada en este estudio es de mayor a menor en madera> corteza> hojas> rama gruesas> ramas finas. Dicha secuencia coincide con la de otros autores (González Esparcia et al., Spangenberg et al., Cortez y Madeira, citados por Brañas et al., 2000) sobre *Eucalyptus globulus*.

Varela (2009) en *Eucalyptus globulus*, en suelos de basamento cristalino encontró que la biomasa solamente del fuste para edades de 9 a 12 años fue en promedio de 100 Mg ha⁻¹, sin embargo en este estudio encontramos que en promedio la producción de biomasa fue de 185.2 Mg ha⁻¹ para el mismo rango de edades. Es de destacar que dicho comportamiento diferencial en la producción de biomasa por hectárea puede estar explicado en que en el trabajo de Varela (2009) la densidad de plantación por hectárea era menor a la que se encontró en nuestro estudio. González (2008) observó en *Eucalyptus globulus* de 10 años de edad, en sitios de Soriano que la producción de madera era de 106.7 Mg ha⁻¹, siendo menor a lo observado en este estudio.

También se observó que con el aumento de la edad de los árboles, la proporción de hojas respecto a otras fracciones disminuye, mientras que para la madera aumenta. Las cantidades de biomasa producida aumentan, a medida que aumenta la edad, excepto para el caso de las hojas que desde los 9 años a 12 años ocurre una menor producción de dicha fracción en Mg ha⁻¹. Según Foelkel (2005) a partir los 6 y 7 años la acumulación de biomasa se da preferentemente en la madera, mientras que la acumulación en hojas, raíces y corteza será a una tasa menor. Andrae, citado por Schumacher y Poggiani (1993), observó que el fuste del árbol representa la mayor cantidad de biomasa producida. Dicha proporción aumenta a medida que el árbol envejece. Tandon et al., citados por Schumacher y Poggiani (1993) estudiaron que para *Eucalyptus grandis*, para edades de 3, 7, 9, y 11 años, a medida que aumenta la edad y el diámetro, el porcentaje de biomasa en el fuste se incrementa y en cambio la proporción de biomasa en la copa decrece. La Figura No. 7 muestra la evolución de la producción de biomasa de las diferentes fracciones destacándose la mayor contribución de la madera a la biomasa total.

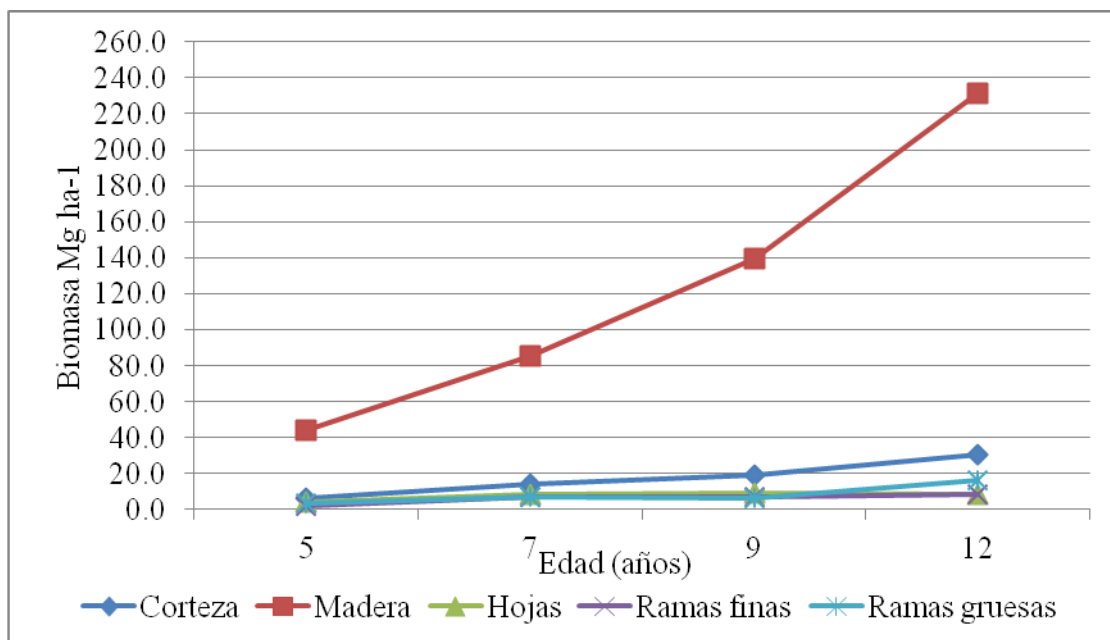


Figura No. 7. Evolución de la producción de biomasa aérea en las diferentes fracciones del árbol en cuatro rodales de *Eucalyptus globulus*.

4.2.3.1 Concentración de nutrientes a distintas edades de la rotación

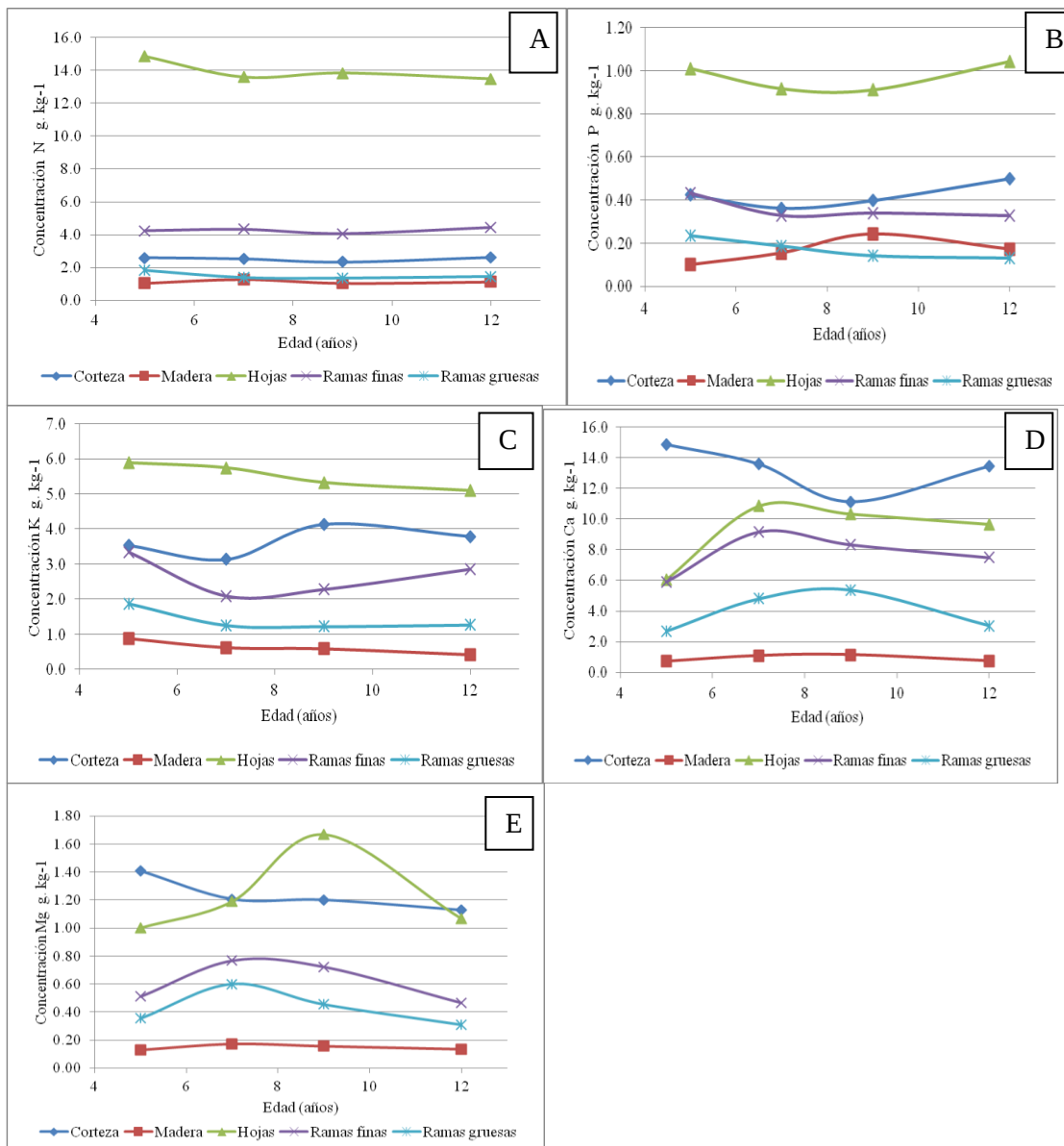


Figura No. 8. Concentración de nutrientes en las diferentes fracciones del árbol en cuatro rodales de *Eucalyptus glóbulus* A) Concentración de N. B) Concentración de P. C) Concentración de K. D) Concentración de Ca. E) concentración de Mg.

En la Figura No. 8 se indica la concentración de nutrientes en las diferentes fracciones del árbol para los cuatro rodales de *Eucalyptus globulus*. Las mayores concentraciones de nutrientes se encuentran en los restos (Figura No. 5). Según este

estudio, las hojas son la fracción que presenta mayor concentración de N, P, K y Mg. La corteza es la fracción que presenta los valores de concentración mas altos de Ca (y solamente para el Mg a los 5 años de edad). Por el contrario, la madera es la fracción que presenta valores de concentración mas bajos para todos los nutrientes analizados. Para el caso de las ramas, las finas presentan mayores concentraciones para todos los nutrientes comparado unicamente con las ramas gruesas. Esto se explica porque tienen una porción importante de tejido vivo. Las ramas finas son la segunda fracción con mayor contenido de N y la tercer fracción con mayor concentración de P, K, Ca y Mg.

Este estudio coincide con autores citados en bibliografía como Brañas et al. (2000), González (2008), Hernández et al. (2009), Viera et al. (2012), Yussim (2013) en el género *Eucalyptus* que la hoja es la fracción que tiene mayor concentración de N, P y que la corteza es la fracción que tiene mayor concentración de Ca. Laclau et al. (2000) en *Eucalyptus*, en suelos ricos en P en el Congo, encontró que para el nutriente P, la fracción que tenía mayor concentración de dicho nutriente fue la corteza. En el presente trabajo se observó que en hojas a los 12 años de edad, hubo 13,9 g kg⁻¹ de N, 0,9 g kg⁻¹ de P y en corteza se observó 13,4 g kg⁻¹ de Ca.

Para el caso del N en hojas, en estudios como el de Viera et al. (2012) en *Eucalyptus urophylla* x *E. globulus* (Brasil), Yussim (2013) en *Eucalyptus dunnii* (Uruguay) obtuvieron valores superiores a los encontrados en este estudio y también al realizado por González (2008) en *Eucalyptus globulus* y Hernández et al. (2009) en *Eucalyptus dunnii* (Uruguay). Relacionado al P en la fracción hojas, en este estudio se observó valores similares a los encontrados por González (2008) en *Eucalyptus globulus*, Hernández et al. (2009) en *Eucalyptus dunnii* (Uruguay), Viera et al. (2012) en *Eucalyptus urophylla* x *E. globulus* (Brasil), Yussim (2013) en *Eucalyptus dunnii* (Uruguay). Por otro lado, la corteza, en nuestro estudio presento los valores más bajos de concentración de Ca respecto a los otros estudios mencionados González (2008), Hernández et al. (2009), Viera et al. (2012), Yussim (2013).

Lo que se puede observar en todos los graficos (concentración de nutrientes) de la Figura No. 8 como tendencia general, es que no hay grandes diferencias en concentración para cada fracción vegetal, entre diferentes edades. Podría explicarse por el reciclaje biogeoquímico y el bioquímico, o sea mineralización de los propios restos que caen (destacar que el *Eucalyptus globulus* es una especie que deja poco mantillo), así como la translocación interna de nutrientes en el árbol. Es decir el árbol esta constantemente retranslocando los nutrientes por eso mantiene la concentración constante. También puede deberse a que la relativamente alta disponibilidad de nutrientes hace que la extracción aumente en la medida que aumenta la biomasa del

árbol y por lo tanto el requerimiento nutricional. Si la disponibilidad de nutrientes fuera baja, lo que absorbe el árbol lo retraslocaría, de manera que las concentraciones en alguno de los componentes aumentarían y en otros disminuirían. Como eso en general no ocurre, daría que pensar que el suministro es adecuado siempre, y en la medida de mayor producción de biomasa, mayor absorción de nutrientes del suelo (y descompuestos del mantillo, aunque en esta especie es reducido), y de esa manera los niveles en los diferentes componentes de cosecha no varían con la edad.

Para el caso del N la fracción hoja presenta los mayores valores a la edad de 5 años, no existiendo grandes diferencias entre edades para las demás fracciones. Observando el comportamiento del P, en las hojas y corteza, éste disminuye su concentración hasta los 7 años y luego comienza a aumentar, mientras que para el caso de las ramas, dicha concentración comienza a descender a lo largo del turno. Por último el P en la madera tiene un aumento en su concentración hasta los 7 años y desciende a los 12 años de edad. El K muestra una tendencia a descender su concentración, de forma muy leve, a lo largo del turno para las fracciones vegetales estudiadas, excepto para la corteza. El K es el único que tiende a disminuir en la madera con la edad. Para el caso del Ca, se observa que de los 5 años a los 7 años las concentraciones aumentan, y luego descienden levemente hasta los 12 años, excepto en la corteza donde la concentración a los 5 años es la más alta, y luego desciende hasta los 12 años. El Mg, tiende a aumentar su concentración hasta los 7 años y luego desciende en todas las fracciones vegetales, excepto en hojas y corteza, donde en las primeras ocurre un aumento en la concentración hasta los 7 años y luego retorna a valores similares encontrados a los 5 años, y en la corteza se observó un descenso en su concentración hasta los 12 años.

Comparativamente al trabajo realizado por Laclau et al. (2000), en donde estudiaron el comportamiento nutricional un clon de *Eucalyptus* hasta los 7 años de edad, ellos observaron para el N que a la edad de 5 años la concentración en hoja fue menor que a los 7 años, contrastando con nuestro trabajo, mientras que para las otras fracciones vegetales no hubo grandes diferencias entre las edades de 5 a 7 años, siendo similar a este trabajo. Observando las concentraciones de P en las fracciones en el trabajo de Laclau et al. (2000), se constatan similitudes respecto a nuestro trabajo, excepto para el caso de la madera, la cual fue disminuyendo desde 5 a 7 años, contrastando con nuestro trabajo. Para el caso del K se observó un comportamiento similar a nuestro trabajo, excepto para las fracciones hojas y madera en donde en las primeras se observa una mayor concentración a los 5 años, y en la madera una concentración constante. En el Ca, en dicho estudio, se observa un comportamiento similar a nuestro trabajo en corteza, madera y ramas gruesas, mientras que para hojas y

ramas finas se observa que las concentraciones disminuyen en las edades de 5 a 7 años. Respecto al Mg, se observa semejanzas a este trabajo, en la tendencia de la concentración para la fracción corteza y madera, sin embargo se observa un comportamiento diferencial respecto a nuestro estudio para las fracciones hoja, rama fina y rama gruesa.

4.2.4 Extracción de nutrientes

En el Cuadro No. 8 se puede observar las concentraciones de nutrientes en madera del fuste y extracción de nutrientes para la madera y los restos (ramas finas, gruesas, hojas y corteza).

Cuadro No. 8. Valores de concentración y extracción de nutrientes en madera y residuos para cuatro rodales de *Eucalyptus globulus*

Edad	Fracción vegetal	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
		g kg ⁻¹					kg ha ⁻¹				
5	Madera	1,0	0,1	0,9	0,7	0,1	46,0	4,3	39,1	32,4	5,7
	Restos						91,1	8,9	63,9	143,1	15,3
7	Madera	1,3	0,2	0,6	1,1	0,2	109,7	13,3	52,1	93,2	14,6
	Restos						189,4	16,5	118,4	391,8	37,4
9	Madera	1,0	0,2	0,6	1,2	0,2	148,5	33,4	81,0	161,6	21,6
	Restos						207,2	18,5	148,4	390,0	45,7
12	Madera	1,1	0,2	0,4	0,8	0,1	260,0	41,0	95,0	173,6	31,3
	Restos						252,6	30,1	214,1	657,5	56,2

La extracción se refiere a la cantidad de nutriente presente en la fracción vegetal, en función de su biomasa producida y la densidad de plantación (número de árboles por hectárea). Según este estudio, para todas las edades, la concentración y extracción correspondiente a cualquier nutriente fue mayor en los restos respecto a la madera. Estos datos son coincidentes con los presentados por Brañas et al. (2000), González (2008), Hernández et al. (2009), Yussim (2013).

4.2.5 Extracción total de nutrientes en cuatro rodales de *Eucalyptus globulus*

En la Figura No. 9 se indican las cantidades totales extraídas de cada nutriente en la biomasa total de los cuatro rodales de *Eucalyptus globulus* evaluados.

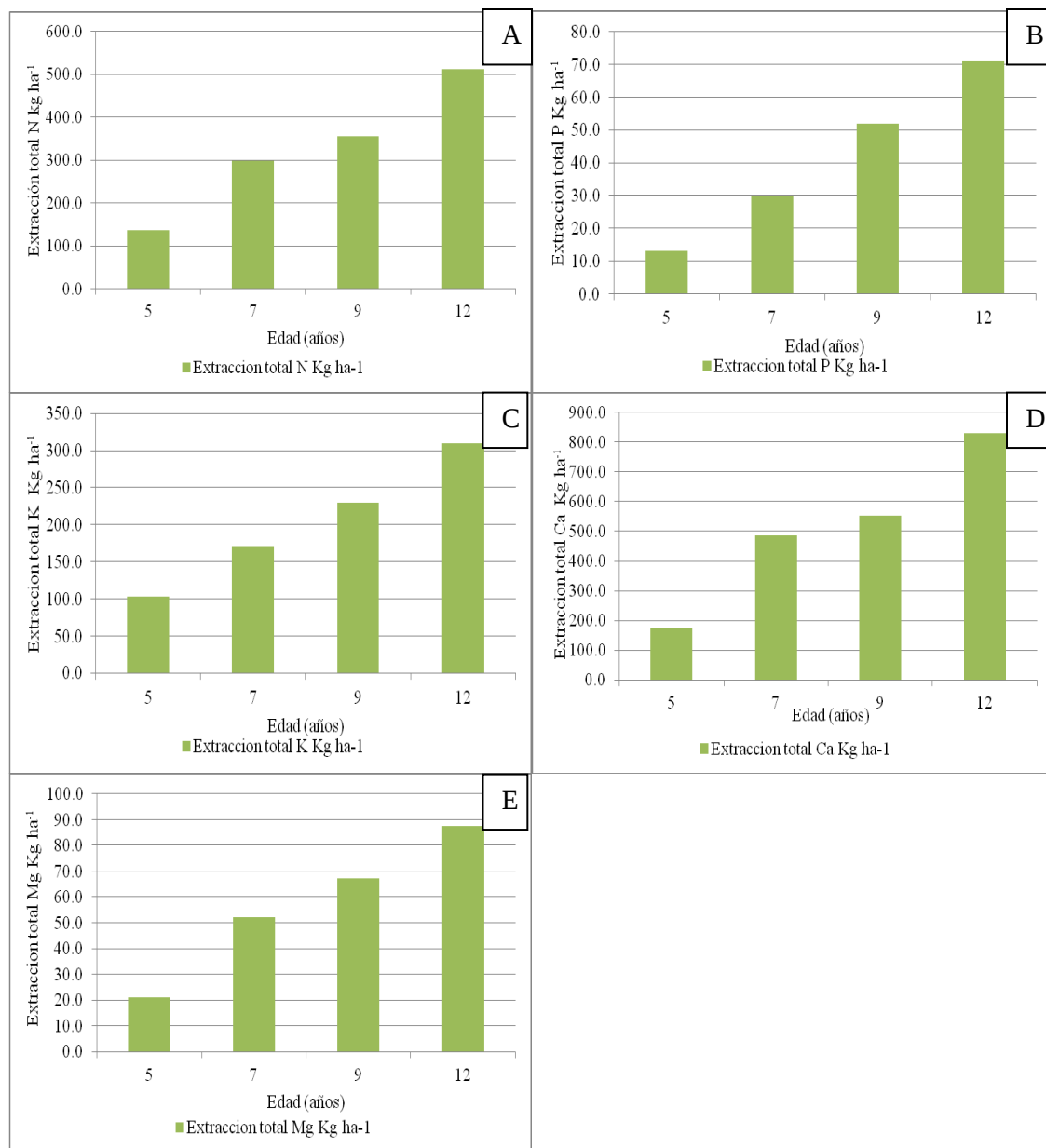


Figura No.9. Cantidades totales de nutrientes en cuatro rodales de *E. globulus* en función de la edad de los árboles. A) N total. B) P total. C) K total. E) Mg total.

En la Figura No. 9 se puede observar que a medida que aumenta la edad de los árboles, las cantidades de nutrientes absorbidas son mayores, con la máxima acumulación a la edad de 12 años, en virtud de la mayor producción de biomasa. A los efectos de evaluar cómo se fue dando esta extracción de nutrientes en las diferentes edades, en el Cuadro No. 9 se indica la tasa de extracción de nutrientes por unidad de superficie y por año.

Cuadro No. 9. Tasa de extracción de nutrientes considerando todas las fracciones del árbol, en $\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$, para cuatro rodales de *Eucalyptus globulus*.

Parcela	Edad	N	P	K	Ca	Mg
	años	----- $\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ -----				
El Canelón	5	27,4	2,6	20,6	35,1	4,2
Talayer	7	42,7	4,3	24,4	69,3	7,4
Pololo1	9	39,5	5,8	25,5	61,3	7,5
Cerro Molina	12	42,7	5,9	25,8	69,3	7,3

Considerando la totalidad de la biomasa aérea del árbol, en el Cuadro No. 9 se puede observar que a partir de los 5 años de edad, la tasa de absorción de nutrientes aumenta y a partir de los 7 años, estas se mantienen de forma similar hasta los 12 años de edad, excepto para el caso del P, en el cual se registran aumentos hasta el rodal de 9 años. Estos resultados probablemente se relacionan con la capacidad exploratoria de las raíces de los árboles, por lo tanto puede inferirse que estas plantaciones llegaron a un nivel estable alrededor de los 7 años. En plantaciones de 5 años las tasas de absorción son más reducidas. En contraste con estos resultados Laclau et al. (2003) reporta incrementos anuales similares para los diferentes nutrientes en las edades 5 y 7 años en plantaciones clonales de *Eucalyptus*. Tratándose de toda la planta, que la tasa de absorción sea constante a cualquier edad, podría interpretarse como que marca cierta independencia con la producción de biomasa. Pero no debe olvidarse que al dividir extracción por años es similar que dividir por biomasa, la cual aumenta con los años.

4.2.6 Extracción de nutrientes en las diferentes fracciones de cosecha para las diferentes edades de los árboles

En la Figura No. 10 se indica la cantidad de nutrientes extraída en las diferentes fracciones según la edad de los árboles en los cuatro rodales de *E. globulus*.

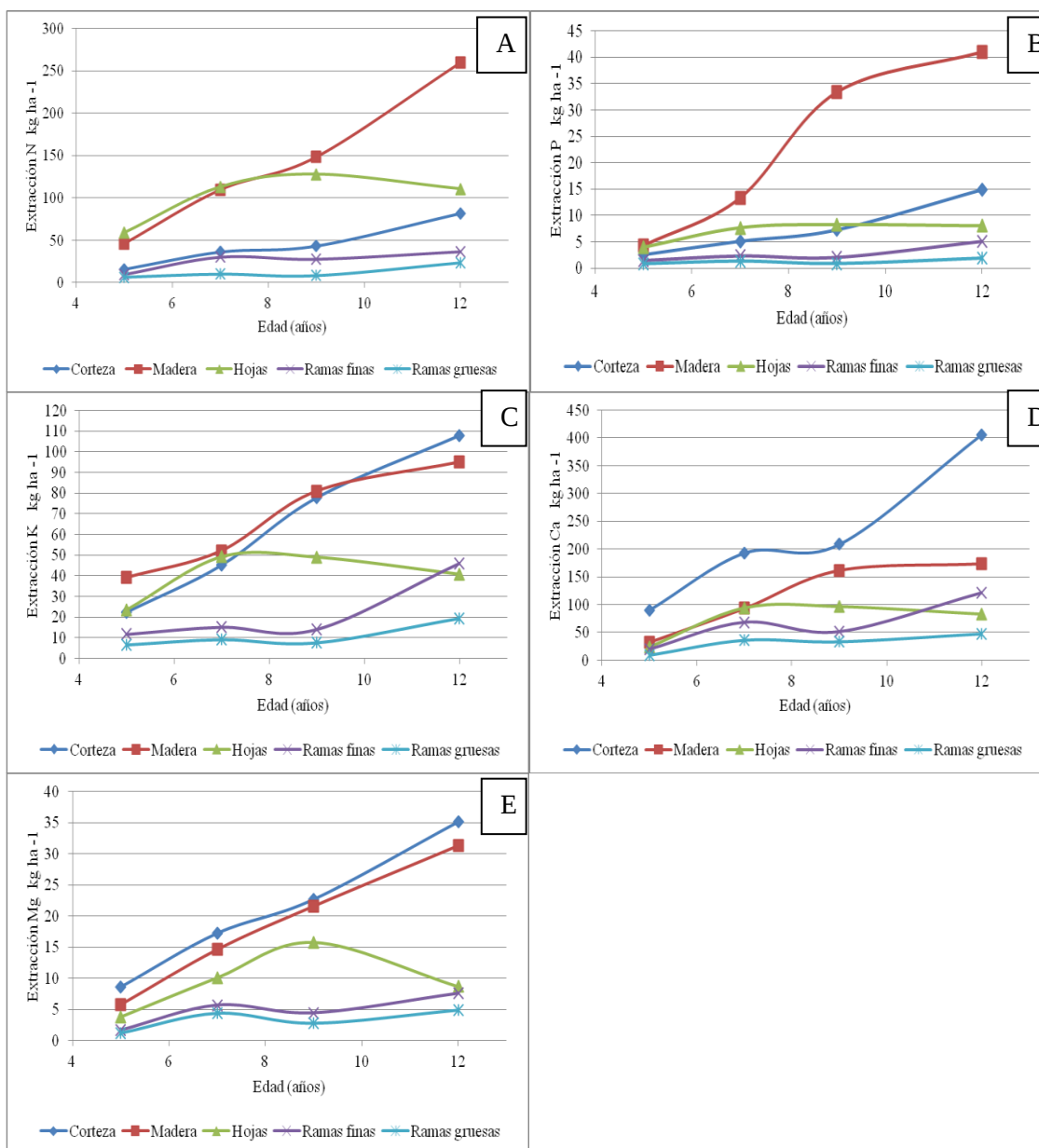


Figura No. 10. Cantidad de nutrientes en las diferentes fracciones según edad de los árboles en cuatro rodales de *E. globulus*. A) Absorción de N. B) Absorción de P. C) Absorción de K. D) Absorción de Ca. E) Absorción de Mg

A diferencia de la Figura No. 8 que expresaba las concentraciones, en la Figura No. 10 se observa que para cada nutriente, la fracción madera y corteza realizan la mayor extracción de nutrientes, debido a la cantidad de biomasa total producida por las mismas. Como se mencionó anteriormente, la madera representa entre el 70% y 79 % de la biomasa producida por el árbol. La cantidad de nutrientes presentes en la madera aumentó con la edad del bosque, mientras que lo contrario se observa en la fracción hoja, la cual se mantiene estable a partir de los 7 años para la mayoría de los nutrientes. Dicho comportamiento en las hojas ocurre porque su participación en la biomasa total es menor (Cuadro No. 7) donde desde los 5 hasta los 12 años el porcentaje de biomasa de hoja en la fracción total pasa de 7 a 3 %, y no tanto por su menor concentración en nutrientes. Las dos fracciones de rama tuvieron aumentos con la edad, aunque más pequeño que la madera. El componente corteza se comportó diferente según el nutriente, aumentando con la edad en forma muy marcada para K, Ca y Mg, y con pequeños aumentos en N y P.

En lo que refiere a la absorción de nutrientes a los 12 años de edad, en este estudio se obtuvo como resultado la siguiente secuencia de cantidades de nutrientes extraídas (considerando únicamente a los nutrientes analizados en este estudio) respecto al conjunto de todas las fracciones de cosecha: $Ca > N > K > Mg > P$. La justificación que el nitrógeno se encuentre por encima del potasio puede deberse a que en los suelos que se encuentran los rodales en estudio, presentan elevados niveles de materia orgánica, la cual es fuente de nitrógeno (Cuadro No. 10).

Además, se pudo observar que las proporciones para cada nutriente absorbidas son muy similares entre edades, excepto para el caso del Ca y K donde se puede observar que, entre edades, la proporción de absorción al inicio (edad 5) de K tiende a ser mayor, y la de Ca menor. Dichas proporciones están originalmente expresadas en $kg\ ha^{-1}$, por lo tanto muy asociadas a la producción de biomasa, y sabiendo que a los 5 años hay muy poca biomasa en corteza (dicha fracción tiene alta concentración de Ca) y valores altos de biomasa en madera (con concentraciones más altas de K, comparado a las otras edades), generaría que en la edad 5 haya menor proporción de absorción de Ca y mayor de K respecto a las otras edades (Cuadro No. 10). Dicha secuencia de absorción coincide con la de otros autores como Hernández et al. (2009) en *E. dunnii* a los 9 años de edad y Viera et al. (2012) en *Eucalyptus urophylla x globulus* (Cuadro No. 11). Esta

secuencia de acumulacion en donde el Ca es el mayor y el P es el menor, se justifica por un comportamineto fisiologico para todas las plantas, lo cual ocurrira para cuialquier planta analizada. Shumacher et al. (2001) en *Eucalyptus maidenii*, González (2008) en *Eucalyptus globulus*, encontraron que el segundo nutriente en extracción fue el K seguido por el N. Yussim (2013) en su estudio concluyó que el nutriente de mayor extracción fue Ca y el menor P a los 10 años de edad. Giosa (2009), Varela (2009) analizando la madera del fuste obtuvo la misma secuencia que en el presente estudio.

Cuadro No. 10. Porcentaje de cada nutriente (obtenido de kg ha⁻¹), estudiados en este trabajo, absorbido por la biomasa total a diferentes edades en cuatro parcelas de *Eucalyptus globulus*

Edad	N	P	K	Ca	Mg	Ranking
Años	%					
5	30	3	23	39	5	Ca>N>K>Mg>P
7	29	3	16	47	5	Ca>N>K>Mg>P
9	28	4	18	44	5	Ca>N>K>Mg>P
12	28	4	17	46	5	Ca>N>K>Mg>P

Cuadro No. 11. Secuencia de mayor a menor de cada nutriente absorbido, estudiados en cada trabajo, a diferentes edades. Datos de revisión bibliográfica.

Especie	Edad	Ranking	Referencia bibliográfica
	años		
<i>E. maidenii</i>	4	Ca>K>N>Mg>P	Schumacher et al. (2001) (Brasil)
<i>E. dunnii</i>	9	Ca>N>K>Mg>P	Hernández et al. (2009) (Uruguay)
<i>E. globulus</i>	10	Ca>K>N>Mg>P	González (2008) (Uruguay)
<i>E. urophylla x globulus</i>	10	Ca>N>K>Mg>P	Viera et al. (2012) (Brasil)
<i>E. globulus</i>	14-18	Ca>K>N>Mg>P	Brañas et al. (2000) (España)

Si a los 12 años, en la producción forestal con fines pulpables, se cosecha la madera (dejando en campo los restos), las cantidades de nutrientes exportados en su totalidad será de un 33,2 % (en 231 Mg ha⁻¹ de biomasa de madera) mientras que en los residuos de la cosecha (corteza, hojas, ramas finas y gruesas) quedaran en el campo representando un 66,8 % (en 63 Mg ha⁻¹ de biomasa de restos) del total de nutrientes presentes en la parte aérea de la biomasa. En nuestro estudio, se observó que la

exportación de nutrientes del sistema (considerando una cosecha a los 12 años, dejando los restos en el sitio) en la madera se distribuye (como porcentaje respecto al total del nutriente presente en la biomasa aérea); 58% P (41 kg ha^{-1}), 51% N (260 kg ha^{-1}), 36% Mg ($31,3 \text{ kg ha}^{-1}$), 31% K (95 kg ha^{-1}), 21% Ca ($173,6 \text{ kg ha}^{-1}$).

Para el caso del Mg, el descenso de Mg en la fracción hoja a los 12 años podría estar explicada porque en dicho sitio las cantidades de Mg intercambiable eran menores respecto a los demás sitios.

Teniendo en cuenta el rodal de 5 años de edad de nuestro estudio, y suponiendo que la cosecha fuera para bio-energía (dejando únicamente la biomasa hoja en el campo), la exportación de nutrientes sería del 57 % de N (78 kg ha^{-1}), 70 % P ($9,1 \text{ kg ha}^{-1}$), 77% K ($79,5 \text{ kg ha}^{-1}$), 86 % Ca ($151,6 \text{ kg ha}^{-1}$) y 82 % Mg ($17,2 \text{ kg ha}^{-1}$) del total presente en la biomasa aérea.

De todas formas, es de destacar que un sistema productivo forestal para bio-energía, se realiza a una densidad de plantación mucho mayor (3000 árboles por hectárea por ej.), por lo tanto, si bien los porcentajes de exportación no variarían, existirá una mayor exportación del ecosistema forestal en términos absolutos (kg ha^{-1}) de cada nutriente.

4.3 DISTRIBUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES A LO LARGO DEL FUSTE

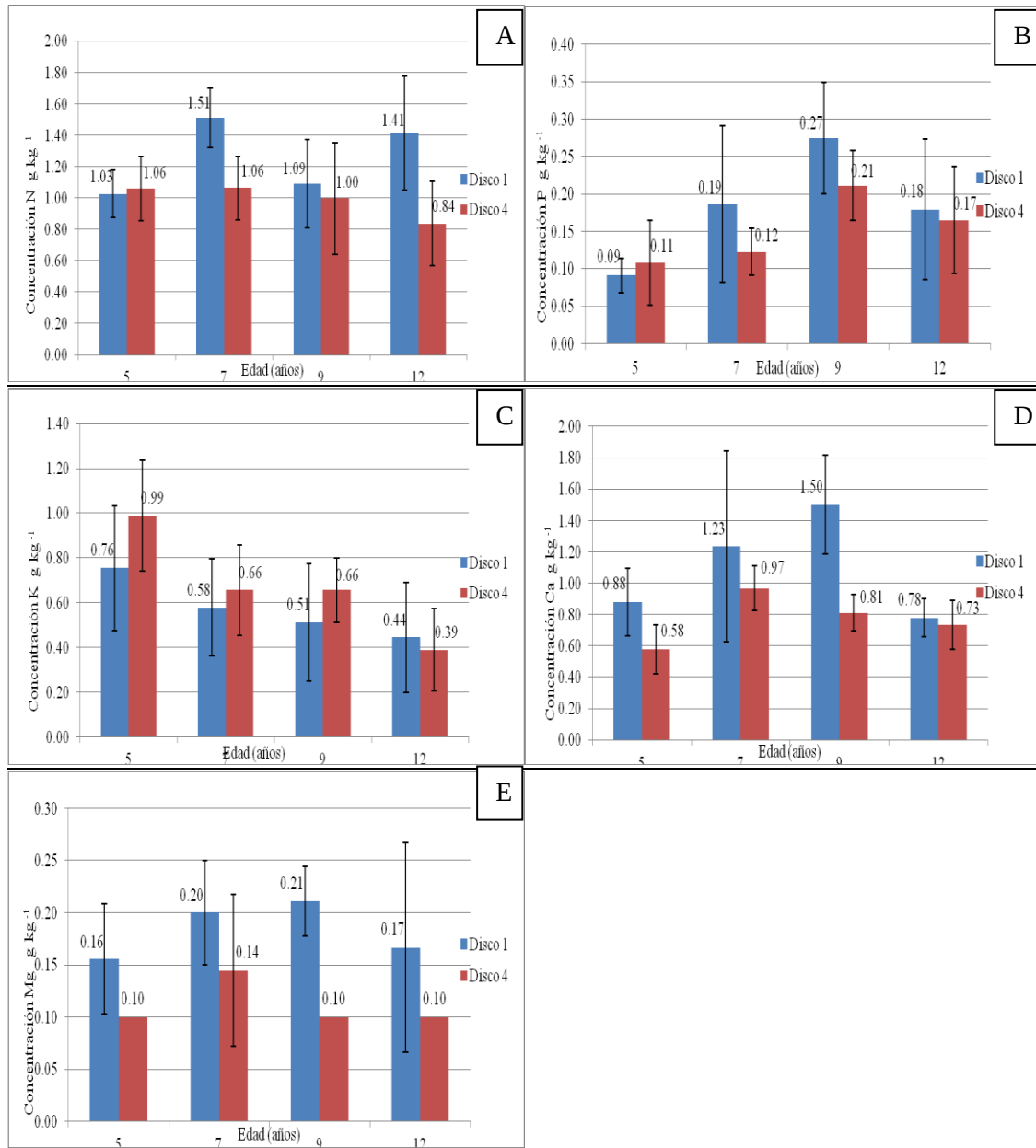


Figura No. 11. Concentración de nutrientes en los discos de madera correspondientes a troza basal (disco No. 1) y cuarta troza (ubicado a 7.20 m de altura en el árbol: disco No. 4) A) Concentración de N, B) Concentración de P, C) Concentración de K, D)

Concentración de Ca y E) Concentración de Mg para los cuatro rodales de *Eucalyptus globulus*. Las barras indican desvío estándar de los 9 árboles.

En la Figura No. 11 se indica la concentración de nutrientes en la madera correspondiente a la troza basal (disco No. 1) y la 4ª troza (ubicado a 7.20 m de altura en el árbol: disco No. 4). Se observa, de acuerdo a los desvíos estándar, que no hay grandes diferencias para la mayoría de los casos entre concentración de nutrientes y las alturas del disco analizadas en este estudio. Las excepciones están en la concentración de Ca a los 9 años de edad donde se observa un valor mayor para el disco ubicado en la base, y en la concentración de Mg a los 9 años donde se observa la misma tendencia descripta.

Las tendencias que se observan, es que el K tiende a concentrarse más en el disco No. 4, que en el No. 1 (a excepción de la edad 12 años). Ocurre lo contrario con N, P, Ca, Mg. Dicho comportamiento podría deberse a una razón fisiológica del árbol y no tanto por razón de movilidad de nutriente, debido a que tanto N, P, Mg como K son móviles y se comportan diferente. A los 12 años de edad, en nuestro estudio la concentración de disco No. 1 siempre es mayor a la de disco No. 4.

Comparativamente a otros estudios realizados González (2008) en *E. globulus* de 10 años y Yussim (2013) en *E. dunnii* de 12 años, en este trabajo se observó que las concentraciones de N en madera fueron más altas, y con una tendencia similar en que es mayor la concentración en disco No. 1 que el No. 4. Para el caso del P, en nuestro trabajo se observaron concentraciones mayores, pero las tendencias fueron diferentes, ya que González (2008) no tuvo diferencias entre discos, y Yussim (2013) la tendencia que encontró fue que en disco No. 4 fue mayor a disco No. 1. Para el caso del K las concentraciones encontradas en este estudio fueron mayores a las reportadas por González (2008), Yussim (2013). En esos estudios en coincidencia con el nuestro para las edades 5; 7; y 9 años la concentración de K fue mayor en disco No. 4. En el Ca y Mg, en nuestro estudio se observó que las concentraciones en madera fueron menores a los de González (2008), Yussim (2013), y las tendencias observadas en este estudio fueron similares a la de Yussim (2013), siendo la concentración mayor en disco No. 1, mientras que González (2008) observó que la mayor concentración estaba en disco No. 4.

Otro autor, Giosa (2009) en *E. grandis*, observó que para el N y Ca la concentración en disco basal > disco medio coincidiendo con nuestros resultados, mientras que para el P, K y Mg la concentración de disco basal < disco medio, en contraposición con nuestros resultados. Varela (2009) en *E. globulus*, en suelos similares a los de este estudio, encontró que para N y Mg la concentración es mayor en disco basal

que disco medio, mientras que para los nutrientes P, K y Ca la mayor concentración se observó en disco medio, respecto al basal.

Para el caso de los trabajos realizados por González (2008), Giosa (2009), Varela (2009), encontraron un alto desvío estándar en los datos obtenidos para ambos discos, lo que implicaría que desde dicho punto de vista no existirían diferencias entre discos.

4.4 RELACIÓN ENTRE EL CONTENIDO DE NUTRIENTES EN MATERIAL VEGETAL Y PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO

4.4.1 Relación entre contenido de bases en la fracción vegetal y los suelos de cuatro rodales de *E globulus* analizados

4.4.1.1 Relación entre contenido de bases en suelos de cuatro rodales de *E globulus* y concentración en fracción madera y hoja

En las Figuras No. 12 y 13 se presentan la relación entre el contenido de bases (K, Ca y Mg) en la fracción madera y hojas con el suelo correspondiente a cada uno de los sitios experimentales utilizados en este trabajo. Se puede observar que la tendencia de concentración de nutriente en la fracción madera y hoja, es muy similar a las cantidades de nutriente en suelo.

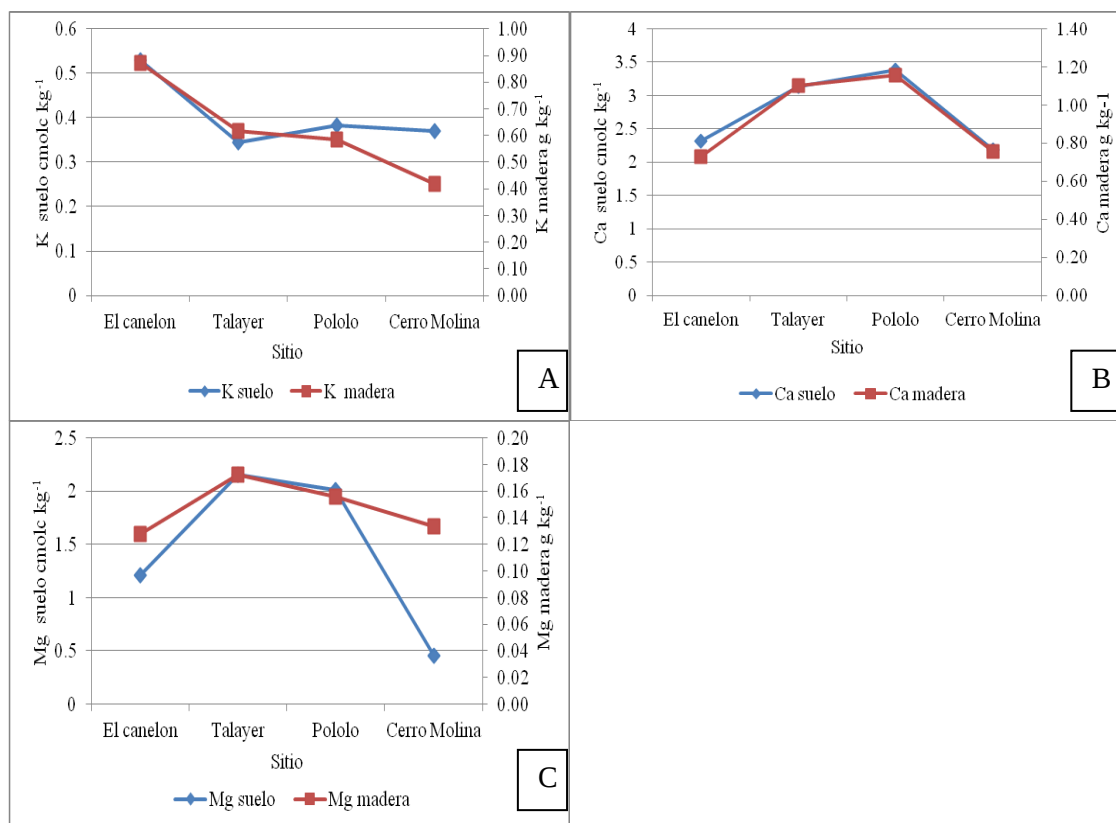


Figura No. 12. Relación entre contenido de nutrientes en madera y cationes en el suelo en cuatro rodales de *E. globulus* A) K. B) Ca. C) Mg. Los sitios El Canelón, Talayer, Pololo y Cerro Molina corresponden a las edades de 5; 7; 9 y 12 años respectivamente.

En la Figura No. 12 se puede observar que la cantidad de Ca, K y Mg observada en cada suelo de los sitios experimentales, presenta unos valores que demarcan una tendencia muy similar a las concentraciones de dichos nutrientes en la fracción madera del árbol. Es decir que a más nutriente en suelo, habrá más concentración en madera de dicho nutriente. Esto ocurre para los nutrientes analizados, Ca, K y Mg. Comúnmente dicho comportamiento se le denomina “consumo de lujo”. Es importante considerar los nutrientes concentrados en la madera, debido a que es el principal producto de exportación del sitio, para la producción de pulpa de celulosa.

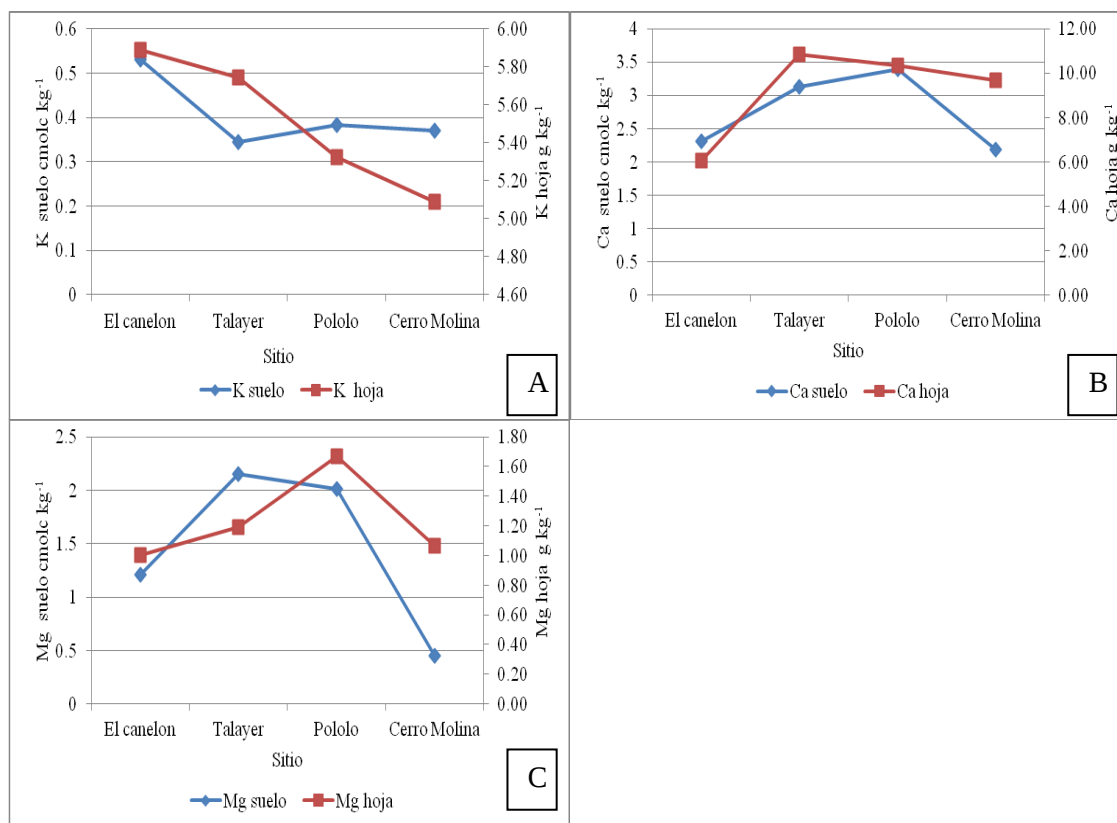


Figura No. 13. Relación entre contenido de nutrientes en hoja y cationes en el suelo en cuatro rodales de *E. globulus* A) K. B) Ca. C) Mg. Los sitios El Canelón, Talayer, Pololo y Cerro Molina corresponden a las edades de 5; 7; 9 y 12 años respectivamente.

En la Figura No. 13, correspondiente a las hojas y el nutriente en el suelo, se observa el mismo comportamiento, es decir que la concentración de nutriente en las hojas del árbol muestran una tendencia similar a lo que son las cantidades de nutrientes en el suelo al que corresponde.

4.4.2 Relación entre contenido de bases en la fracción madera y el suelo de otros estudios

También se observó la relación entre el contenido de bases (K, Ca y Mg) en la fracción madera y suelos analizados en otros estudios. Los datos se obtuvieron de González (2008), que corresponde a un estudio realizado en suelos del litoral oeste del

Uruguay cuyo sitio está dentro del grupo 9.5 CONEAT. Se utilizó el suelo del grupo CONEAT 9.5, debido a que es un tipo de suelo contrastante a los del grupo CONEAT 2, con el fin de observar una tendencia clara en la existencia de “consumo de lujo”. Se puede observar que para el caso del Ca, a medida que aumenta la disponibilidad de éste en el suelo bajo forma intercambiable (horizontes A y B), como es el caso de los suelos dentro del grupo CONEAT 9.5, la absorción del mismo por parte de la madera del árbol en términos generales es mayor. En el caso del Mg podría existir una tendencia similar (Cuadro No. 12).

Cuadro No. 12. Comparativo entre concentración de nutrientes en fracción madera y cantidad de catión bajo forma intercambiable en suelos de diferente grupo CONEAT.

		K		Ca		Mg		Referencia bibliográfica
CONEAT	Edad	K suelo	K madera	Ca suelo	Ca madera	Mg suelo	Mg madera	
	Años	cmol _c kg	g kg ⁻¹	cmol _c kg	g kg ⁻¹	cmol _c kg	g kg ⁻¹	
9.5	10	0.31	0.4	13.55	1.3	2.65	0.2	González (2008) (Uruguay)
2.11a	12	0.4	0.4	1.39	0.76	0.6	0.1	Este trabajo

5 CONCLUSIONES

La producción de biomasa aérea es mayor a medida que aumenta la edad del rodal, estando la diferencia fundamentalmente explicada por el incremento en la fracción madera, en menor medida también se registraron aumentos en corteza y ramas, en tanto que la biomasa de hojas fue menor para el rodal de 5 años, pero no hubo diferencias importantes en la fracción hoja entre los rodales de 7; 9 y 12 años.

La proporción de madera en la biomasa del árbol fue mayoritaria con respecto a las demás fracciones, aún en el rodal más joven, y aumentó desde 70 % para el de 7 años hasta 79% a 12 años. En cambio la proporción de hojas disminuyó con la edad de los rodales, desde 7% a los 5 años a 3 % a los 12 años. . Por lo tanto se observó un rango de producción de biomasa aérea de 70-79% en madera y 30-21% de biomasa en restos. Al realizar una cosecha a los 12 años de edad solamente de la biomasa madera, se da una exportación del 30 % del total de nutrientes presentes en esa biomasa aérea, quedando el 70% restante en el sitio.

No se observaron diferencias de magnitud en las concentraciones de nutrientes entre edades para cada fracción vegetal de la biomasa aérea analizada. Las cantidades de nutrientes presentes en los suelos, permiten que las concentraciones se mantengan estables en las diferentes fracciones de la biomasa aérea a lo largo del turno.

Para la mayoría de los nutrientes la hoja fue la fracción que presentó mayor concentración en todas las edades, excepto para el caso del Ca, donde la mayor concentración ocurrió en corteza. La fracción con menor concentración de nutrientes fue la madera, excepto para el P, el cual presentó también baja concentración en la fracción rama gruesa.

La cantidad de nutrientes en la biomasa aérea, considerando todas las fracciones del árbol, fue mayor a medida que aumentó la edad del rodal. En cuanto a la comparación de las diferentes fracciones, se observó que la madera presentó la mayor acumulación de N, P y K, pero para el Ca y Mg la fracción de mayor contenido total fue la corteza. Para todas las edades, y todos los nutrientes, la suma de extracción en las fracciones que corresponden a restos de cosecha fue mayor a la extracción de nutrientes en madera del fuste.

La tasa de acumulación de nutrientes en biomasa aérea fue menor en el rodal de 5 años, y a partir de los 7 años, estas se mantienen de forma similar hasta los 12 años de

edad, excepto para el caso del P, en el cual se registran aumentos hasta el rodal de 9 años. Esta tasa de suministro de nutrientes relativamente constante a lo largo de la vida de los árboles estaría indicando que no existirían limitantes por parte de los suelos para el suministro de los nutrientes.

Se encontró una relación entre los contenidos de Ca, K y Mg en los horizontes A, de los sitios evaluados, con las concentraciones de esos mismos nutrientes en la fracción madera y hoja de los árboles. Es decir a mayor contenido en suelo, habrá mayor concentración de cationes en las fracciones, que no se traduce en una mayor producción de la fracción biomasa. Denominado “consumo de lujo”.

Para lograr una producción forestal sustentable en el largo plazo es importante considerar la dinámica de los nutrientes en los ecosistemas forestales. Conocer la evolución de la biomasa producida y los nutrientes retenidos en las diferentes fracciones del árbol permite realizar un manejo racional de las plantaciones forestales. En el presente trabajo se cuantificó la producción de biomasa y extracción de nutrientes por parte de árboles de *Eucalyptus globulus* a las edades de 5, 7, 9 y 12 años en la zona este del Uruguay. La producción de biomasa aérea se relacionó directamente con la edad del rodal, lo que fue fundamentalmente explicado por el incremento en la cantidad de madera, en menor medida también se registraron aumentos en corteza y ramas, en tanto que la biomasa de hojas, si bien, fue menor para el rodal de 5 años, pero no hubo diferencias importantes en esta fracción entre los rodales de 7, 9 y 12 años. La proporción de madera en la biomasa del árbol fue mayoritaria con respecto a las demás fracciones, variando desde 70 % (para el rodal de 7 años) hasta 79 % (a 12 años). En cambio la proporción de hojas fue de 7 % a los 5 años y de 3 % a los 12 años. Las concentraciones de todos los nutrientes (g kg^{-1}) no mostraron diferencias importantes a las diferentes edades para cada fracción vegetal. La hoja fue la fracción que presentó mayor concentración de nutrientes en todas las edades, excepto para el caso del Ca, donde la mayor concentración ocurrió en corteza. La fracción con menor concentración de nutrientes fue la madera del fuste, excepto para el P, el cual presentó también baja concentración en rama gruesa. La cantidad de nutrientes (kg ha^{-1}) en biomasa aérea, considerando todas las fracciones del árbol, fue mayor a medida que aumentó la edad del rodal. La madera presentó la mayor acumulación de N, P y K, pero para el Ca y Mg la fracción de mayor contenido total fue la corteza. Para todas las edades, y todos los nutrientes, la suma de extracción en las fracciones que corresponden a restos de cosecha fue mayor a la extracción de nutrientes en madera del fuste. Con respecto al segundo objetivo del trabajo, se encontró una relación entre los contenidos de Ca, K y Mg en los horizontes A, de los sitios evaluados, con las concentraciones de esos mismos nutrientes en la fracción madera y hoja de los árboles. Es decir a mayor contenido en suelo, hubo mayor concentración de cationes en las fracciones denominado “consumo de lujo”.

Palabras clave: Forestación; *Eucalyptus*; *Eucalyptus globulus*; Biomasa; Extracción; Concentración; Nutrientes; Suelos forestales; Basamento cristalino; Edad de plantación.

To achieve sustainable forest production in the long term it is important to consider the dynamics of nutrients in forest ecosystems. The knowledge of the evolution of the produced biomass and retained nutrients in the different fractions of the tree allows you to make more rational management of forest plantations. In this work, it was quantified the production of biomass and nutrient extraction from *Eucalyptus globulus* trees at ages 5, 7, 9 and 12 in the eastern part of Uruguay. There is a narrow relationship between aerial biomass production and age of trees, mainly because of the high increase of wood production, and also in the increase of bark, branches and leaves. The proportion of wood in the tree biomass was the biggest respect to the other fractions, varying between ages from 70% (at 7 years old) to 79% (at 12 years old). In contrast, the proportion of leaves was 7% at 5 years old and 3% at 12 years old. Although the concentrations of all nutrients showed no significant differences at different ages for each aerial biomass fraction, some variations were observed, with increases between 5 and 7 years old in Ca and Mg and lower values for 9 (years of age) and 12 (years of age), while N, P and K showed declines between 5 and 7 (years of age) and increases in older age. Leaves were the fraction that presented the highest concentration of nutrients at all ages, except for the case of Ca, where the highest concentration occurred in the bark. The fraction with a lowest concentration of nutrients was the stem wood, except for P, which also showed low concentration in branches. The amount of nutrients (kg ha⁻¹) in biomass, considering all the aerial fractions of the tree, increased in proportion to the age of the tree. The wood had the greatest accumulation of N, P and K, but Ca and Mg the bark was the fraction that presented highest values. For all ages, and for all the nutrients, the amounts of extractions were higher in crop residues (like leaves, barks and branches) than in stem wood. There is a strong relationship between the concentration of Ca, K and Mg in the soil and the concentrations of these nutrients in the stem wood and leaves. That is to say, the higher content in soil, the greater concentration of cations in the wood and leaves.

Keywords: Forestry; *Eucalyptus*; *Eucalyptus globulus*; Biomass; Extraction; Concentration; Nutrients; Forest soils; Crystalline Basement; Age of tree.

8 BIBLIOGRAFÍA

1. Balboa Murias, M. A. 2005. Biomasa arbórea y estabilidad nutricional de los sistemas forestales de *Pinus pinaster* Ait., *Eucalyptus globulus* Labill. Y *Quercus robur* en Galicia. Tesis PhD. Lugo, España. Universidad de Santiago de Compostela 255 p.
2. Bellote, A. F.; Ferreira, A. C. 1995. Mineral nutrients and growth of fertilized *Eucalyptus grandis* in the State of São Paulo, Brazil. *Bosque*. 16(1): 69-75.
3. Bossi, J. 2007. Regiones geológicas para aplicación agronómica. Montevideo, Facultad de Agronomía. 86 p.
4. Brañas, J.; González-Río, F.; Merino, A. 2000. Contenido y distribución de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus globulus* del noroeste de la península ibérica. *Recursos Forestales*. 9(2): 317-334.
5. Bray, R. H.; Kurtz, L. T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*. 59:39-45.
6. Brussa, C. 1994. *Eucalyptus*. Montevideo, Hemisferio Sur. 328 p.
7. Caldeira, M. V. W. 1998. Quantificação da biomassa e do conteúdo de nutrientes em diferentes procedências de Acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild). Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Santa Maria, Brasil. Universidade Federal de Santa Maria. 96 p.
8. Chapin III, S.; McFarland, J.; McGuire, A. D.; Euskirchen, E. S.; Ruess, R. W.; Kielland, K. 2009. The changing global carbon cycle; linking plant–soil carbon dynamics to global consequences. *Journal of Ecology*. 97: 840–850.
9. Dell, B.; Malajczuk, N.; Grove, T. 1995. Nutrient disorders in plantation Eucalypts. Canberra, Australian Center For International Agricultural Reserch. 110 p.
10. FAO. 2011. Situación de los bosques del mundo. (en línea). Roma. 176 p. Consultado 12 jul. 2014. Disponible <http://www.fao.org/docrep/013/i2000s/i2000s.pdf>

11. Fife, D. N.; Nambiar, E. K. S. 1984. Movement of nutrients in *Pino radiata* needles in relation to the growth of shoots. *Annals of Botany*. 54: 303-314.
12. Foelkel, C. 2005a. Casca da árvore do eucalipto; aspectos morfológicos, fisiológicos, florestais, ecológicos e industriais, visando a produção de celulose e papel. (en línea). s.l., Eucalyptus Online and Newsletter. 109 p. Consultado 12 jul. 2014. Disponible en <http://www.eucalyptus.com.br/disponiveis.html>
13. _____. 2005b. Minerais e nutrientes das árvores dos eucaliptos; aspectos ambientais, fisiológicos, silviculturais e industriais acerca dos elementos inorgánicos presentes nas árvores. (en línea). s.l., Eucalyptus Online and Newsletter. 133 p. Consultado 12 jul. 2014. Disponible en <http://www.eucalyptus.com.br/disponiveis.html>
14. Giosa, R. 2009. Cuantificación del contenido de nutrientes en trozas comerciales de *Eucalyptus grandis* con destino a la fabricación de pula y su relación con el tipo de suelo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad Agronomía. 104 p.
15. González, D. A. 2008. Extracción de nutrientes por cosecha de *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus maidenii*. Tesis maestría. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 89 p.
16. González, J.; Balboa Murias M.A.; Merino, A.; Soalleiro, R. R. 2005. Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. Instituto de Biodiversidade e Desenvolvimento Agrario, Recursos Rurais. 1(1): 21-30
17. González Esparcía, E.; Penalva Rodríguez, F.; Gómez Altamirano, C. 1985. Exigencias nutritivas del *Eucalyptus globulus* en el suroeste español comparadas con las de otras especies. *Anales del INIA*. 9:63-74.
18. Google Earth. 2015. Imagen satelital del predio Redalco S.A y alrededores. (en línea). s.l. Consultado 15 jul. 2015. Disponible en <http://www.googleEarth.com>
19. Hernández, J.; Zamalbide, J. P. 1998. Procesos de retención de P por los suelos evaluados a través de parámetros de suelo y planta. *Agrociencia* (Montevideo). 1(2). 48-63.

20. _____.; Del Pino, A.; Salvo, L.; Arrarte, G. 2009. Nutrient export and harvest residue decomposition patterns of a *Eucalyptus dunnii maiden* plantation in temperate climate of Uruguay. *Forest Ecology and Management*. 258: 92-99.
21. _____.; _____.; Pérez Bidegain, M.; Martínez, L.; Califra, A. 2013. Mejores prácticas de manejo de suelos en plantaciones y replantaciones de eucalipto y pino. Montevideo, Proyecto Comisión Sectorial Investigación Científica. 80 p.
22. Laclau, J. P.; Bouillet, J.; Ranger, J. 2000. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. *Forest Ecology and Management*. 128: 181–196.
23. _____.; _____.; Ranger, J.; Joffre, R.; Gouma, R.; Saya, A. 2001. Dynamics of nutrient translocation in stemwood across an age series of a eucalyptus hybrid. *Annals of Botany*. 88: 1079-1092.
24. _____.; Delporte, P.; Ranger, J.; Bouillet, J. P.; Kazotti, G. 2003. Nutrient dynamics throughout the rotation of *Eucalyptus* clonal stands in Congo. *Annals of Botany*. 91(7): 879-892.
25. Lindsay, W. L.; Norvell, W. A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America*. 42:421-428.
26. Malavolta, E.; Vitti, G. C.; De Oliveira, S. A. 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas; princípios e aplicações. 2ª ed. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo. 319 p.
27. Marchner, H. 2003. Mineral nutrition of higher plants. London, Academic Press. 889 p.
28. MAP. CONEAT (Ministerio de Agricultura y Pesca. Comisión Nacional de Estudio Agroeconómico de la Tierra, UY). 1979. Índices de productividad grupos CONEAT. Montevideo. 167 p.
29. Merino García, A. 2008. Extracción de biomasa en los suelos forestales, principales variables a tener en cuenta para evitar la degradación del suelo. *Cuadernos de la Sociedad Española Ciencias Forestales*. 25: 23-32

30. MGAP. DGF (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección General Forestal, UY). s.f. Recurso forestal. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 20 ago. 2014. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,20,441,O,S,0,MNU;E;134;2;MNU>
31. _____. DIEA (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias, Uruguay). 2000. Sistema información censo agropecuario 2000 (SICA). (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 10 ago. 2014. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/portal/page.aspx?2,diea,diea-sica,O,es,0>
32. _____. RENARE (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Dirección de Recursos Naturales Renovables, Uruguay). s.f. CONEAT digital. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 20 ago. 2014. Disponible en <http://web.renare.gub.uy/sl/coneat/>
33. _____. OPYPA (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Oficina de Programación y Política Agropecuaria, UY). 2011. Indicadores de actividad forestal (en línea). Anuario 2011: s.p. Consultado 10 ago. 2014. Disponible en <http://www.mgap.gub.uy/opypapublicaciones/ANUARIOS/Anuario2011/material/pdf/08.pdf>
34. Murphy, J.; Riley, J. P. 1962. A modified single solution methods for determination of phosphate in natural waters. *Anaitica Chimica Acta*. 27: 31-36.
35. Ouro, G; Pérez Batallón, P; Merino, A. 2001. Effect of silvicultural practices on nutrient status in a *Pinus radiata* plantation; nutrient export by tree removal and nutrient dynamics in decomposing logging residues. *Annals of Forestry Science*. 58: 411-422.
36. Pritchett, W. 1986. Suelos forestales, propiedades, conservación y mejoramiento. México, D.F., Limusa. 634 p.
37. Reis de Assis, M. 2012. Modelagem da biomassa seca e estoque de carbono total em *Eucalyptus* considerando diferentes estagios iniciais de crescimento. Tesis maestría. Lavras, Brasil. Universidade Federal de Lavras. 197 p.

38. Santana, R.C.; Barros, N.F.; Neves, J.C.L. 1999. Biomassa e conteu do de nutrientes de procedencias de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sitios florestais do Estado de Sao Paulo. *Ciencia Florestais*. 56: 155–169.
39. Schumacher, M. V.; Poggiani, F. 1993. Producao de biomassa e remocao de nutrients em povoamentos de *Eucalyptus camandulensis* Dehnh, *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus torelliana* F. Muell, plantados em Anhembi, SP. *Ciencia Florestal* (Santa Maria). 3(1): 21-34.
40. _____.; Winckler Caldeira, M. V. 2001. Biomass estimation and nutrient content of a *Eucalyptus globulus*(*Labillardiere*) *subespecie maidenii* plantation. *Ciencia Florestal* (Santa Maria). 11(1): 45-53.
41. _____.; Witschoreck, R; Calil, F. N. 2011. Biomassa em povoamentos de *Eucalyptus* spp. De pequenas propriedades rurais em Vera cruz, RS. *Ciencia Florestal* (Santa Maria). 21(1): 17-22.
42. SPF (Sociedad de Productores Forestales del Uruguay, UY) .2011. El sector forestal en el Uruguay. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 20 ago. 2014. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/~forestal/Archivos/Sector%20Forestal%20Uruguayo%20marzo%202011.pdf>.
43. Tisdale, S.; Nelson, W. 1975. Soil fertility and fertilizers. 3rd. ed. New York, Macmillan. 694 p
44. Tolosana, E. 2009. Manual técnico para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal. Madrid, Mundi-Prensa. 348 p
45. Varela, S. 2009. Cuantificacion de la extraccion de nutrients por trozas comerciales de *Eucalyptus globulus* en suelos de basamento cristalino de la zona este del pais. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 112 p.
46. Van Lierop, W. 1990. Soil pH and lime requirement determinations, In: Westernam, R. L. ed. Soil testing and plant analysis. Madison, WI, Soil Science Society of America. pp. 73-126 (SSSA Book Series no. 3).
47. Viera, M.; Schumacher, M. V.; Truby, P.; Araújo, E. F. 2012. Biomassa e nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*, em Eldorado do Sul-RS. *Ecologia e Nutrição Florestal* (Santa Maria-RS). 1 (1): 1-13

48. _____.; _____.; Winckler Caldeira, M. V; Watzlawick, L. F. 2013. Nutrient content in monospecific and mixed stands of *Eucalyptus urograndis* and *Acacia mearnsii* in an agroforestry system. *Ciencia Florestal* (Santa Maria). 23 (1): 67-76.
49. Walkley, A.; Black, T. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37:29-38.
50. Waring, R. H.; Schlesinger, W. H. 1985. Forest ecosystem, concepts and management. Orlando, FL, Academic Press. 340 p.
51. Wise, P. K.; Pitman, M.G. 1981. Nutrient removal and replacement associated with short-rotation eucalypt plantations. *Australian Forestry Journal*. 44: 142–152.
52. Yussim, A. 2013. Exportación de nutrientes en trozas comerciales de *Eucalyptus* sp. en diferentes suelos de prioridad forestal del Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 69 p.

9 ANEXOS

Sitios de plantaciones de *E. globulus* sobre Terreno Cuchilla Dionisio

Sitio: POLOLO 1

Ubicación: Establecimiento REDALCO S.A

Zona: Rocha

Coordenadas: 34°07'10.91''S / 54°02'53.25''O

Relieve local: ladera alta 5%

Relieve general: sierras algo rocosas (filitas)

Uso: *E. globulus* Silvaseed Yeodene

Clasificación tentativa: Inceptisol Melánico



Descripción del perfil

Horizonte	Profundidad	Descripción
Ap	0-14 cm	7.5 YR 3,5 ó 4 /3; Franco graviloso; con abundante gravilla.
A	14-27 cm	7.5 YR 4.5/4; Franco; con abundante gravilla.
AC	27-44 cm	10 YR 4.5/4; Franco.
C	44+ cm	10 YR 4/4; Franco arcillo arenoso con gravilla.

Datos analíticos

Parcela	Horiz.	Prof.	pH		Complejo de Intercambio							SB	C
					Ca	Mg	K	Na	A.I.	BT	CICe		
		cm	H ₂ O	KCl	cmol _c kg ⁻¹							%	%
Pololo 1	Ap	0 - 14	5.65	4.88	2.04	1.90	0.39	0.43	0.14	4.76	4.90	97.1	3.03
Pololo 1	A	14 - 27	4.73	3.44	4.81	2.17	0.38	0.44	1.06	7.80	8.86	88.0	1.06
Pololo 1	AC	27 - 44	4.72	3.25	3.31	1.97	0.38	0.52	1.72	6.18	7.90	78.2	0.67
Pololo 1	C	+ 44	4.67	3.15	2.34	1.8	0.48	0.52	3.02	5.14	8.16	63.0	0.49

Sitio: CERRO MOLINA

Ubicación: Establecimiento REDALCO S.A

Zona: Rocha

Coordenadas: 34°11'28.19"S / 54°07'06.96"O

Relieve local: ladera media 10-20% pendiente.

Relieve general: sierra no rocosa, escasos afloramientos (filitas).

Uso: *E globulus* chivilingo

Clasificación tentativa: Acrisol Ócrico



Descripción del perfil

Horizonte	Profundidad	Descripción
Ap	0-18 cm	5YR 3/3; Franco gravilloso; con abundante gravilla y gravas. Con gravas con variabilidad horizontal.
A	18-33 cm	5YR 3/2; Franco gravilloso; con guijarros angulosos, mas húmedo que el horizonte anterior.
2 Bt1	33-63 cm	50% del color del horizonte es 2.5 YR 4/6; hay moteados (representan 30% del color del horizonte) grandes, prominentes de color 10YR 3/6; y feldespatos poco alterados (20%) 7.5 YR 6/8 a veces son blancos; Arcilloso.
2 BT2	63-99 cm	La matriz (principal) del horizonte es 5 YR 4/6 (80% del color del horizonte); color amarillo 7,5 YR 6/8 (es un 10% del color del horizonte); y moteados rojos 10 R 3/6 iguales al horizonte anterior son más escasos; Arcilloso.
2 BC	99-120 cm	2,5 YR 4/6; Arcilloso-Arcillo Limoso con arena media y gruesa.

Datos analíticos

Parcela	Horiz.	Prof.	pH		Complejo de Intercambio							SB	C
					Ca	Mg	K	Na	A.I.	BT	CICe		
		cm	H ₂ O	KCl	cmol _c kg ⁻¹							%	%
C° Molina	Ap	0 - 18	4.00	3.41	3.11	0.5	0.43	0.34	1.92	4.38	6.30	69.6	3.45
C° Molina	A	18 - 33	3.96	3.40	1.27	0.4	0.31	0.35	2.46	2.33	4.79	48.6	2.36
C° Molina	Bt1	33 - 63	4.08	3.51	1.22	1.1	0.56	0.7	3.79	3.58	7.37	48.6	1.21
C° Molina	Bt2	63 - 99	4.08	3.50	0.74	0.55	0.34	0.63	3.63	2.26	5.89	38.4	0.39
C° Molina	BC	99 - 120	4.11	3.53	0.59	0.46	0.3	0.4	4.60	1.75	6.35	27.6	0.22

Sitio: TALAYER

Ubicación: Establecimiento REDALCO S.A

Zona: Rocha

Coordenadas: 34°10'48.51''S / 54°00'20.57''O

Relieve local: ladera 15-20% pendiente

Relieve general: sierras algo rocosas (filitas).

Uso: *E. globulus* Carrajung

Clasificación tentativa: Inceptisol Melánico

**Descripción del perfil**

Horizonte	Profundidad	Descripción
Ap	0-15 cm	7.5 YR 3/2; Franco limoso
A	15-30 cm	7,5 YR 3/1.5; Franco limoso pero con abundante gravilla que enmascara la textura; gravilla y grava hasta de 10 cm de diámetro.
C	30-55+ cm	7.5 YR 5/4 (80% del color del horizonte) y 7,5 YR 6/6 (20% del color del horizonte) es la filita alterada; Arcillo limoso.

Datos analíticos

Parcela	Horiz	Prof.	pH		Complejo de Intercambio							SB	C
					Ca	Mg	K	Na	A.I.	BT	CICe		
		cm	H ₂ O	KCl	cmol _c kg ⁻¹							%	%
Talayer	Ap	0 - 15	4.36	3.45	2.97	2.29	0.37	0.51	2.17	6.14	8.31	73.9	2.63
Talayer	A	15 - 30	4.58	3.51	3.30	2.02	0.32	0.55	2.15	6.19	8.34	74.2	2.23
Talayer	C	+ 55	5.01	3.33	2.69	2.75	0.13	0.58	2.58	6.15	8.73	70.4	0.76

Sitio: EL CANELÓN

Ubicación: Establecimiento REDALCO S.A

Zona: Rocha

Coordenadas: 34°30'29.83''S/ 54°26'12.27''O

Relieve local: ladera media 10% pendiente.

Relieve general: sierras algo rocosas (filitas).

Uso: *E. globulus* Clon Don Anselmo

Clasificación tentativa: Luvisol Ócrico



Descripción del perfil

Horizonte	Profundidad	Descripción
Ap	0-10 cm	7.5YR 3/3 (s); Franco limoso-Franco con arena.
A	10-30 cm	7.5 YR 2.5/3; Franco-Franco limoso; 70% Gravilloso y con gravas cuarzosas de hasta 15 cm (+60 % V)
Bt	30-47 cm	Matriz 7.5 YR 3/4 (60% del color del horizonte), 30 % del horizonte con moteados abundantes 2.5 YR 4/8 y 10% del horizonte 7,5 YR 7/8; Arcilloso; bn; con concreciones Fe y Mn, pocas.
BC	47-88 cm	Matriz 5 YR 4/6 con moteados 2,5 YR 4/8 común y 7.5 YR 7/8 (10% del color del horizonte) que son filitas alterándose; Arcillo limoso con nódulos Arcillo arenoso.
C	88-117 cm	Matriz 2.5 YR 4/6, 7.5 YR 7/6 (30% del color del horizonte) y con moteados 2.5 YR 4/8; Franco arcillo arenoso (arena media a gruesa) con nódulos Arcillo arenoso.
C	117-130 cm	Mezcla de colores; 5 YR 4.5/6 hacia la base; Franco arcillo arenoso y Arena gruesa; horizonte muy similar al anterior.

Datos analíticos

Parcela	Horiz ·	Prof.	pH		Complejo de Intercambio							SB	C
					Ca	Mg	K	Na	A.I.	BT	CICe		
		cm	H ₂ O	KCl	cmol _c kg ⁻¹							%	%
El Canelón	Ap	0 -10	4.57	3.74	2.05	1.17	0.5	0.48	0.99	4.20	5.19	80.9	1.89
El Canelón	A	10 - 30	4.60	3.81	2.57	1.25	0.56	0.45	0.91	4.83	5.74	84.1	2.37
El Canelón	Bt	30 - 47	4.91	3.86	3.22	3.07	0.65	0.49	1.24	7.43	8.67	85.6	1.11
El Canelón	BC	47 - 88	4.86	3.77	1.84	1.94	0.27	0.43	1.86	4.48	6.34	70.7	0.31
El Canelón	C1	88 - 117	4.92	3.71	1.44	2.41	0.2	0.41	2.11	4.46	6.57	67.9	0.09
El Canelón	C2	117 - 130	4.96	3.80	1.68	2.26	0.21	0.45	1.75	4.60	6.35	72.5	0.13