

**Fondo Nacional de Financiamiento Forestal
Forest Monitoring System for REDD+ Costa Rica**

**Eucalipto (*Eucalyptus spp.*): condiciones para su cultivo
“Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las
reservas de carbono”**

**Héctor A Martínez H
Consultor**

Moravia, Mayo de 2015

Acrónimos

ACT:	Área de Conservación Tempisque
AFE:	Administración Forestal del Estado
BID:	Banco Interamericano de Desarrollo
BM:	Banco Mundial
CACH:	Centro Agrícola Cantonal de Hojancha
CAF:	Certificado de Abono Forestal
CAFA:	Certificado de Abono Forestal por Adelantado
CATIE:	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CODEFORSA:	Comisión de Desarrollo Forestal de San Carlos
COOPEAGRI:	Cooperativa Agrícola Industrial y de Servicios Múltiples El General
CRUSA:	Fundación Costa Rica - USA
FAO:	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FONAFIFO:	Fondo Nacional de Financiamiento Forestal
FSC:	Forest Stewardship Council
FUNDECOR:	Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central
IMA:	Incremento Medio Anual
ISO:	International Standard Organization
MINAE:	Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica
OET:	Organización para Estudios Tropicales
ONF:	Oficina Nacional Forestal de Costa Rica
PIB:	Producto Interno Bruto
PNDF:	Plan Nacional de Desarrollo Forestal
PSA:	Pago por Servicios Ambientales
REDD+:	Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de bosques
SINAC:	Sistema Nacional de Áreas de Conservación
TIR:	Tasa Interna de Retorno

Contenido

Acrónimos	ii
Resumen ejecutivo.....	5
1. Antecedentes	6
1.1 Marco de referencia	6
1.2 ¿Por qué eucaliptos?	7
2.1 Precipitación anual.....	7
2.2 Temperatura	8
2.3 Altitud.....	8
2.4 Suelos	8
2.4.1 Textura.....	8
2.4.2 Drenaje.....	9
2.5.3 Reacción del suelo	9
2.5.4 Profundidad.....	9
3. Formas de reproducción y producción en vivero	11
3.1 Reproducción por semillas y otras formas	11
3.2 Fertilización y controles químicos.....	12
3.3 Preparación y envío.....	13
4. Establecimiento.....	13
4.1 Época de plantación.....	13
4.2 Protección de las plantaciones	13
4.3 Selección del sitio y preparación del suelo	14
4.3.1 Fertilización al trasplante.....	17
5. Manejo	19
5.1 Densidad de plantación	19
5.2 Control de malezas.....	20
5.3 Fertilización.....	20
5.3.1 Deficiencias nutricionales	25
5.3.2 Efecto de la fertilización al trasplante	26
5.4 Respuesta a la fertilización	27
5.4.1 Respuesta del <i>Eucalyptus grandis</i>	27

5.4.2 Respuesta de <i>Eucalyptus deglupta</i>	30
5.4.3 Respuesta de <i>Eucalyptus saligna</i>	30
5.4.4 Respuesta de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	30
5.5 Podas	31
5.6 Raleos	31
5.7 Crecimiento	31
5.7.1 <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	33
5.7.2 <i>Eucalyptus deglupta</i>	33
5.7.4 Respuesta del eucalipto a la acidez del suelo	35
5.7.5 Respuesta al encalado	35
5.7.6 Efectos sobre las propiedades del suelo	36
5.8 Plagas y enfermedades.....	37
5.9 Cosecha	39
5.10 Costos	41
Literatura citada	42
Anexo 1. Metodología para elaboración del mapa de Áreas Potenciales para Especies Seleccionadas...	46

Resumen ejecutivo

Eucalyptus spp. es el género de especies comerciales más ampliamente plantado en el mundo, con especies ampliamente conocidas como *Eucalyptus grandis*, y sus híbridos, ampliamente plantado en América del Sur y África; *E. globulus*, plantado extensamente en Chile, Argentina y otros países, *E. deglupta* plantado en diferentes países, entre ellos Uruguay y Costa Rica. Todas las especies son plantadas tanto para la producción de madera para aserrío, tableros (compensados y aglomerados), astillas para la producción de pulpa para papel. El género *Eucalyptus spp* (y dentro de él *E. deglupta*, *E. grandis*, *E. saligna* y *E. camaldulensis*) ha sido seleccionada como una de las especies prioritarias en el proyecto “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”.

Las especies del género se caracterizan por ser:

- Rápido crecimiento y turnos relativamente cortos que, dependiendo de la especie y el objetivo de la plantación y la calidad del sitio seleccionado, puede variar entre 6 – 15 años ;
- *Eucalytus deglupta* es la especie más conocida en Costa Rica, utilizada para la producción de madera para aserrío, construcción y en el pasado para la manufactura de tableros compensados; también se ha plantado *E. saligna* y *E. grandis* caracterizadas por su crecimiento rápido;
- Con silvicultura conocida, experiencia nacional y disponibilidad de técnicos capacitados e información disponible, producto de investigación realizada en el pasado;
- Existencia de incentivos (pago por servicios ambientales) y la posibilidad de acceder a créditos para el establecimiento y manejo.

E. deglupta, *E. grandis*, *E. saligna*, *E. citriodora* y otras especies del género se desarrollan bien en ambientes con altitudes sobre el nivel del mar inferiores a 600 m, sobre terrenos con hasta 25% se pendiente y suelos de los órdenes Ustolls, Ustalfs, Ustepts, Orthents y Oxisoles, preferiblemente con pH entre 5,0 y 6,5, precipitaciones entre 1000 y 2500 mm anuales y estación seca de 1-3 meses y 22º C – 30º C. estas condiciones se encuentran tanto en Guanacaste y la Península de Nicoya, como en zona norte y atlántica y en la provincia de Puntarenas, parte de la península de Osa y la región limítrofe con Panamá.

Eucalipto (*Eucalyptus spp.* — MYRTACEA —): condiciones para su cultivo

Héctor A Martínez H
Consultor

1. Antecedentes

1.1 Marco de referencia

Los “Términos de Referencia para la contratación de la consultoría Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono” (TdR) establecen que el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) es el responsable, según asignación legal, del financiamiento del sector forestal costarricense, mediante el financiamiento a través de dos modalidades: pago por servicios ambientales y crédito dirigido a pequeños y medianos productores. FONAFIFO es, además, el punto focal de REDD+ y responsable de la ejecución de tareas del Readiness Plan (RP), el cual ha definido como una de las acciones estratégicas para Redd+ el aumento de la producción y el consumo sostenible de madera, como una de las formas para aumentar la cobertura forestal, reducir el peligro de deforestación en el mediano plazo y aumentar la fijación y almacenamiento de carbono.

La consultoría indicada ha sido contratada por el FONAFIFO y responde ante un Comité Evaluador, nombrado por el Director Ejecutivo de FONAFIFO, del que forma parte la Oficina Nacional Forestal (ONF), ente público no estatal creado por la Ley Forestal Nº 7575 para promover el desarrollo forestal del país.

El objetivo general de la consultoría es: Mejorar las condiciones para el fomento de la reforestación comercial, los sistemas agroforestales y silvopastoriles para aumentar los acervos de carbono.

El logro de este fin requiere el alcance de los siguientes objetivos específicos:

- a) Estimar las existencias de plantaciones forestales, identificando las barreras que desalientan la actividad.
- b) Desarrollar paquetes tecnológicos para el establecimiento de plantaciones forestales, mejorando las capacidades de los involucrados en dichas actividades.
- c) Promover el establecimiento de las plantaciones forestales con fines de producción de madera para usos de larga duración.

La promoción del establecimiento de las plantaciones forestales con fines de producción de madera requiere, como paso previo, la identificación de las principales barreras a la actividad. Los términos de referencia para el presente trabajo de consultoría solicitan la elaboración de paquetes tecnológicos para el establecimiento de plantaciones forestales, mejorando las capacidades de los involucrados en dichas actividades, para cinco especies prioritarias. Previamente se elaboró un documento para la priorización de las especies¹ y entre ellas se seleccionó *Eucalyptus spp.* (incluyendo *Eucalyptus deglupta*) (eucalipto).

¹ Martínez H., H.A. 2014. Preselección de especies en la consultoría “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”. Moravia, Costa Rica, FONAFIFO (Fondo Nacional de Fomento Forestal). 39 p.

1.2 ¿Por qué eucaliptos?

Eucalyptus spp. es el género de especies comerciales más ampliamente plantado en el mundo, con especies ampliamente conocidas como *Eucalyptus grandis*, y sus híbridos, ampliamente plantado en América del Sur y África; *E. globulus*, plantado extensamente en Chile, Argentina y otros países, *E. deglupta* plantado en diferentes países, entre ellos Uruguay y Costa Rica. Todas las especies son plantadas tanto para la producción de madera para aserrío, tableros (compensados y aglomerados), astillas para la producción de pulpa para papel. El género *Eucalyptus spp.* (y dentro de él *E. deglupta*, *E. grandis*, *E. saligna* y *E. camaldulensis*) ha sido seleccionada como una de las especies prioritarias en el proyecto “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”.

Rápido crecimiento y turnos relativamente cortos que, dependiendo de la especie y el objetivo de la plantación y la calidad del sitio seleccionado, puede variar entre 6 – 15 años ; *Eucalyptus deglupta* es la especie más conocida en Costa Rica, utilizada para la producción de madera para aserrío, construcción y en el pasado para la manufactura de tableros compensados; también se ha plantado *E. saligna* y *E. grandis* caracterizadas por su crecimiento rápido.

Normalmente se utilizan semillas para su reproducción, las cuales deben ser adquiridas en bancos de semillas especializados, o importarlas directamente de Australia o Papua, Nueva Guinea; Con silvicultura conocida, experiencia nacional y disponibilidad de técnicos capacitados e información disponible, producto de investigación realizada en el pasado;

Disponibilidad de áreas con condiciones adecuadas para el establecimiento de plantaciones, aunque el precio de la tierra puede constituir un factor limitante: cartografía reciente (anexo 1) indica que en el país se cuenta con aproximadamente 1.143.140 ha aptas para cultivo de las diferentes especies.

Existencia de incentivos (pago por servicios ambientales) y la posibilidad de acceder a créditos para el establecimiento y manejo.

E. deglupta, *E. grandis*, *E. saligna*, *E. citriodora* y otras especies del género se desarrollan bien en ambientes con altitudes sobre el nivel del mar inferiores a 600 m, sobre terrenos con hasta 25% de pendiente y suelos de los órdenes Ustolls, Ustalfs, Ustepts, Orthents y Oxisoles, preferiblemente con pH entre 5,0 y 6,5, precipitaciones entre 1000 y 2500 mm anuales y estación seca de 1-3 meses y 22º C – 30º C. estas condiciones se encuentran tanto en Guanacaste y la Península de Nicoya, como en zona norte y atlántica y en la provincia de Puntarenas, parte de la península de Osa y la región limítrofe con Panamá.

2. Requerimientos biofísicos

2.1 Precipitación anual

Dependiendo de la especie, el rango de precipitación va desde 200 – 3.500 mm en el área de distribución natural, mientras que en América Central las principales especies cultivadas en la zona se

han establecido en zonas con precipitación que varía entre 620 y 4600 mm, con hasta siete meses secos (FAO 1981; Boland *et al.* 1984 (cuadro 1).

Eucalyptus es el género más importante de los árboles australianos, aunque algunas especies no se restringen exclusivamente al territorio de Australia; sus especies dominan tanto en las áreas húmedas como en la zona seca del continente (Boland *et al.* 1984).

Existen más de 700 especies y variedades, la mayoría oriundas de Australia². Dos especies: *E. urophylla* y *E. deglupta*, son endémicas fuera de Australia. La primera es originaria de Timor y otras islas de la parte oriental del archipiélago de Indonesia, mientras que la segunda lo es del norte de Nueva Guinea, Sulawesi y Mindanao. Debido a la gran diversidad de especies que crecen en Australia, se asume que el género ha tenido allí su centro de desarrollo y evolución y que en el pasado, los progenitores de los eucaliptos estuvieron allí para crear una gran cantidad de especies adaptadas a cada nicho de su variada geografía (FAO 1981; Boland *et al.* 1984; Hillis y Brown 1984).

En la actualidad se encuentran distribuidos por gran parte del mundo y debido a su rápido crecimiento frecuentemente se emplean en plantaciones forestales para las industrias papelera, maderera, energética o para la obtención de productos químicos, además de su valor ornamental. Las especies más plantadas con propósitos industriales son *E. grandis*, *E. saligna*, *E. globulus*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. urophylla*, *E. robusta*, *E. maculata*, *E. paniculata*, y *E. viminalis* (Hillis y Brown 1984); en América Central Costa Rica en particular debe *E. deglupta* y *E. citriodora*.

2.2 Temperatura

En las áreas de distribución natural del género, las temperaturas medias oscilan entre -8° C y 40° C. Donde se han cultivado especies del género en América Central las temperaturas generalmente varían entre 22° C y hasta 30° C (CATIE 1986).

La temperatura anual es muy variable en el área de distribución natural por la amplitud geográfica de la misma, que se extiende desde aproximadamente 10° N hasta 38° S y desde 120° E a 150° E y las diferencias de altitud presentes.

Debido a la extensión del área de distribución natural, las temperaturas extremas son bastante amplias, desde -8° C hasta 40° C (Boland *et al.* 1984, CATIE 1986).

2.3 Altitud

Las especies crecen hasta los 1200 msnm, aunque se ha recomendado plantarlas abajo de los 600 m.

2.4 Suelos

2.4.1 Textura

Los suelos son bastante variados; las especies del género se han plantado en suelos desde franco arenosos hasta franco arcillosos y arcillosos; los órdenes de suelo comprenden alfisoles, entisoles, inceptisoles, molisoles hasta vertisoles.

² Hay quienes afirman que existen 2800 especies de eucaliptos (<http://www.australia.com/es-cl/facts/plants.html>; revisado 30.04.2015)

En las áreas naturales las especies del género se desarrollan sobre suelos desde arenosos, arenosos francos, hasta arcillosos (FAO 1981).

2.4.2 Drenaje

Las especies muestran su mejor crecimiento en suelos profundos, húmedos, bien drenados y con buen suministro de nutrientes, aunque algunas de las especies se desarrollan bien en suelos húmedos, pero bien drenados.

2.5.3 Reacción del suelo

Debido a la plasticidad de las especies, se presentan buenos crecimientos en suelos con pH arriba de 5,0 y hasta 6,5. En las áreas de distribución natural los suelos muestran diversidad de reacción, desde muy ácidos (pH 4,5) hasta suelos básicos (FAO 1981; Boland et al. 1984).

2.5.4 Profundidad

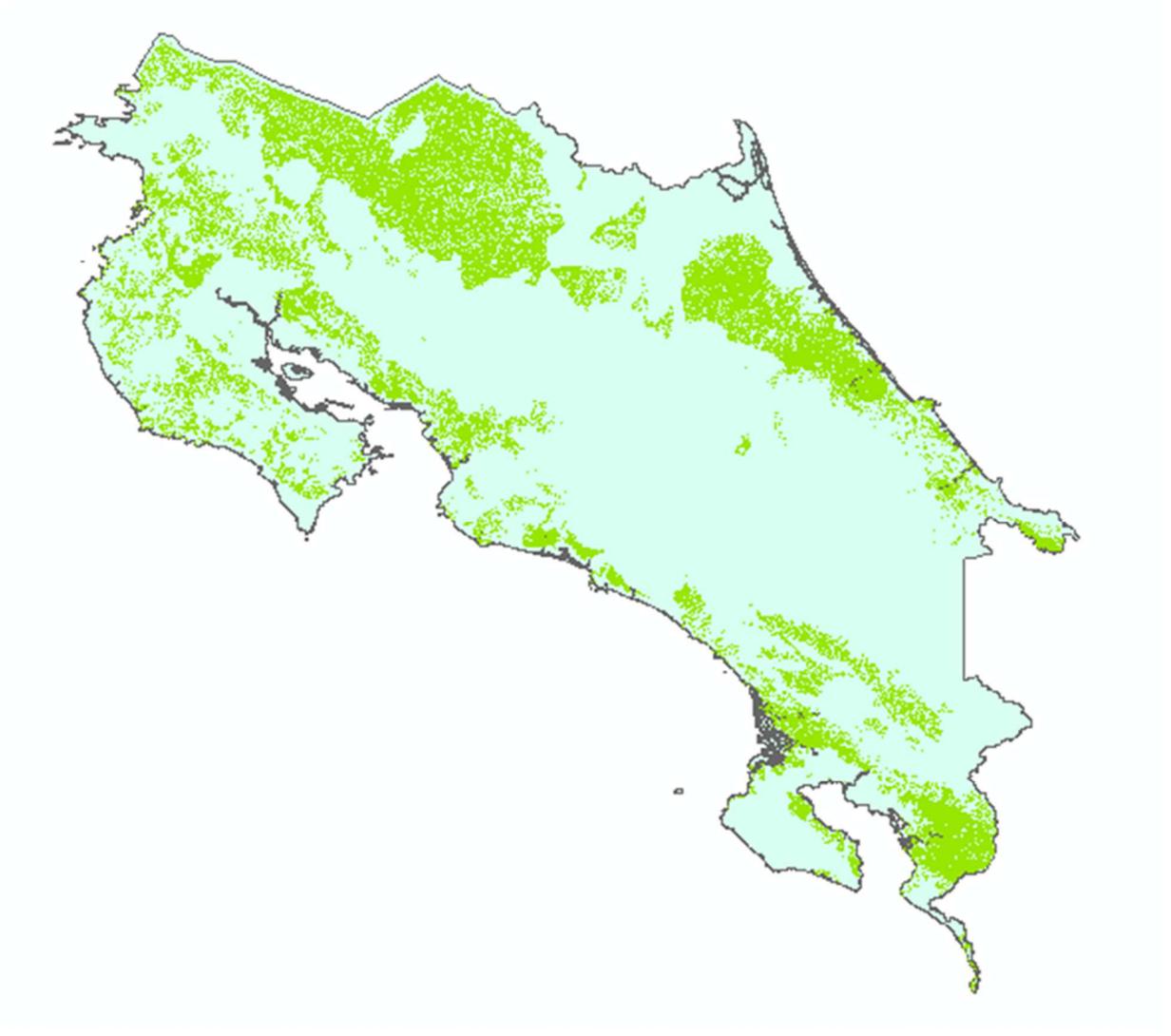
Aunque se ha plantado en suelos poco profundos, el crecimiento no ha sido adecuado; en general se requieren suelos profundos, sueltos, bien drenados, sin capas endurecidas.

Cuadro 1. Requerimientos biofísicos para el cultivo de Eucalyptus									
Especie	pH	Pendiente	altitud (msnm)		precipitación (mm)		sequía (meses)	Temperatura °C	
			Origen	A. Central	Origen	A. Central		Origen	A. Central
Eucalyptus sp.			0 - 1800	0 - 2000	200 - 3500	620 - 4000	4 - 8	3 - 40	18 - 28
Eucalyptus (Óptimo)	5,0-6,5	<25%		<600		1000-2500	1 - 3		22-30
E. camaldulensis			0 - 1200	0-1000	200 - 1250	620 - 2500	4 - 8	3 - 38	20 - 29
E. citriodora			80 - 800	0 - 2000	650 - 1300	850 - 2800	4 - 8	18-35	20 - 26
E. deglupta			0 - 1800	0 - 1100	2500 - 3500	2400 - 4600	0 - 2	24 - 32	20 - 35
E. grandis			0 - 900	0 - 1200	1000 - 3100	1100 - 2500	5 - 6	3 - 40	20 - 32
E. saligna			50 - 1100	50 - 1200	800 - 1800	> 1600	4 - 5	-8 - 33	18 - 26
E. tereticornis			0 - 1800	0 - 1200	500 - 1500	700 - 1400	< 7	2 - 32	21 - 28

Fuente: FAO 1981; Boland et al. 1984; CATIE 1986

De acuerdo con los requerimientos biofísicos indicados para las especies del género, se construyó un mapa que muestra las áreas potenciales para el cultivo de las especies del género. El mismo permitió identificar en forma preliminar un área potencial de 18.187 ha sin limitaciones y un total de 1.143.140 hectáreas donde alguno de los indicadores biofísico no se alcanza completamente.

Estas áreas se distribuyen en la zona Huetar norte, la provincia de Guanacaste, parte de Puntarenas y Limón; la selección de áreas en forma puntual debe incluir además las condiciones del suelo, para determinar el potencial de crecimiento de las especies seleccionadas.



Áreas con potencial para el establecimiento de plantaciones del género *Eucalyptus* (áreas consideradas óptimas).

Fuente: elaboración propia a partir de capas de información geográfica.

3. Formas de reproducción y producción en vivero

3.1 Reproducción por semillas y otras formas

Por el tamaño pequeño de las semillas de la mayoría de las especies, la manipulación se hace difícil y deben colectarse directamente de los árboles, antes de la apertura de las cápsulas seminales. Dado que en América Central no se dispone de rodales semilleros, es más recomendable la obtención de las semillas de Banco de Semillas especializados, o directamente desde Australia.

En general, para todos los eucaliptos en América Central se utiliza la producción de plántulas a partir de semillas, usando, para la germinación, sustratos esterilizados como mezclas de suelos fértiles con arena en proporción 1:1, o solo arena fina, esterilizada para prevenir la aparición de hongos o la germinación de malezas. Los germinadores deben estar protegidos de la lluvia (que puede levantar la semilla o destruir las plantitas), aunque deben permanecer húmedos para favorecer la germinación.

Los porcentajes de germinación son generalmente superiores al 90%, con semillas de calidad y fresca, por lo que no se requieren tratamientos pre-germinativos. El tiempo de germinación fluctúa entre 5 y 12 días en la mayoría de las especies, aunque en el caso de *E. deglupta* se menciona un tiempo de germinación de 15 a 20 días (Salazar, 1987).

En el caso de *E. deglupta* se debe vigilar en forma constante las plántulas recién germinadas y asegurar un trasplante adecuado, tomando en cuenta el tamaño pequeño de las plántulas, lo que las hace susceptibles a daños físicos y el ataque de hongos (Castro et al. 1994). Se requiere buena aireación del área de siembra; asegurar la circulación del aire para evitar el exceso de humedad en el ambiente; utilizar agua limpia para el riego oportuno y adecuado y utilizar iluminación adecuada, no excesiva para evitar el desecamiento de los germinadores.

Las plántulas están listas para el repique cuando tienen una altura de cinco centímetros y han producido las primeras dos hojas verdaderas, generalmente dos a tres semanas después de la germinación. Durante este periodo se debe dosificar el riego y administrar fungicidas cúpricos en dosis adecuadas para evitar la aparición de "damping off" causado por hongos de especies de los géneros *Phytium*, *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Penicillium* y *Phytophthora*.

Debe tenerse especial cuidado en la aplicación de fungicidas, ya que en algunas especies se presentan ectomicorrizas; por ejemplo, en *E. camaldulensis* se asocia con *Pisolithus tinctorius*, *Scleroderma paradoxum*, *Hydnangium carneum* y *Laccaria laccata*.

Las plántulas se repican a recipientes individuales, generalmente bolsas de polietileno negro de 10 cm x 20 cm (4" x 8") agujereadas llenas de aproximadamente 800 gm de sustrato (suelo fértil y arena en proporción 2:1 a 3:1); también pueden utilizarse tubetes plásticos o de papel kraft, o pellets de turba (conocidos comercialmente como "jiffys"). Cuando se utilizan recipientes como bolsas o tubetes debe asegurarse que el sustrato queda libre de bolsas de aire (bien compactados), para disminuir los riesgos de ataques fúngicos y desecamiento.

3.2 Fertilización y controles químicos

Las semillas de eucalipto son pequeñas, por lo que se germinan en un sustrato esterilizado de arena o una mezcla 1:1 de arena con suelo fértil, sin la aplicación de fertilizante. Las plantas se mantienen en los germinadores hasta que alcancen el tamaño de repique; en el caso de *E. saligna* las plantas tardan de 10 a 20 días para germinar y el tamaño de trasplante a bolsa se realiza cuando tienen 4 hojas verdaderas mientras que en el caso de *E. camaldulensis* las plantas tardan de 5 a 12 días para germinar y el trasplante se realiza con 2 hojas verdaderas (Martínez 1990; CATIE 1991).

Adjoud y Halli (2000) mencionan que el género Eucalipto es uno de los pocos árboles maderables que forma ectomicorrizas, por lo que se acostumbra hacer inoculaciones a nivel de vivero para mejorar la sobrevivencia y el desarrollo de las plántulas en sus fases de crecimiento temprano (Trappe 1997). La inoculación se realiza a partir de micelio vegetativo y por medio de esporas colectadas en el campo (Xianheng et al. 1998), de manera que los árboles lleven la micorriza al campo.

Las plantitas se trasladan a bolsas de 10x20 cm con agujeros y llenas de una mezcla de arena, suelo fértil y un componente orgánico como compost, aserrín de madera o granza de arroz, en una proporción 1:1:1 (Martínez 1990; CATIE 1991). Si se desea un manejo preciso de la nutrición, al preparar el sustrato se pueden adicionar algunos nutrimentos necesarios en ésta fase de crecimiento. Según sea la limitante del sustrato se puede utilizar en g m⁻³ 300 a 500 de P₂O₅; 3 a 6 de B; 1 a 2 de Cu; 15 a 40 de Mn y Fe; y 15 a 25 de Zn y enmiendas como calcita o dolomita (Silveira et al. 2001). Martínez (1990) y CATIE (1991) mencionan que cuando se utiliza en los sustratos suelo pobre, es aconsejable mezclarlo con un fertilizante como 15-15-15 (NPK) a razón de 25 kg m⁻³; sin embargo, debido a los altos riesgos de daño químico a las plántulas, no se recomienda aplicar fertilizante bajo el sistema radical, sino aplicar de 8 g m⁻² de era o bancal de la fórmula 15-38-10 disuelto en agua, después de la sexta semana (Cannon 1983). Un mes antes del trasplante se recomienda eliminar la fertilización con el propósito de lograr endurecimiento y lignificación, de tal forma que las plantas no sufran mucho estrés en las primeras semanas posteriores al trasplante (Cannon 1983).

Para mejorar el crecimiento de las plántulas en Andisoles en Colombia, Vélez (1981) realizó una serie de ensayos de fertilización en viveros de *E. grandis*, encontrando que la adición conjunta de 40 g m⁻² de urea con 400 g m⁻² de calfos causó la mejor respuesta, sin que la adición de K tuviera ningún efecto positivo adicional. En esta fase (Silveira et al. 2001), las deficiencias nutricionales son poco comunes y los principales problemas se deben a toxicidades y desequilibrios nutricionales, principalmente de boro y manganeso, causadas por malas dosificaciones y manejo del sustrato. En el caso de deficiencias, estas pueden corregirse con aplicaciones de fertilizante foliar, basándose en valores establecidos de concentración foliar.

Barros y Novais (1990), recomiendan aplicar, en la fase de vivero, cantidades de nitrógeno en dosis de entre 50 y 150 g m⁻³ de sustrato, iniciando por la menor dosis, y de ser necesario, aplicar el resto de modo fraccionado, pudiendo observarse respuestas positivas y generalizadas. Para el fósforo, recomiendan aplicar 200 a 300 g P m⁻³ de sustrato, utilizando una fuente soluble preferentemente, ya que su disponibilidad natural es muy baja, y puede observarse respuestas generalizadas y de gran magnitud. Para el caso del K, recomiendan elevar la concentración en el sustrato hasta 30 ppm, para el S

recomiendan la aplicación de 20 a 40 g m⁻³ de sustrato. En cuanto al uso de enmiendas, recomiendan su uso con el objetivo tanto de corregir la acidez como de adicionar Ca y/o Mg. Así, recomiendan aplicarlas para elevar el contenido de Ca⁺² hasta 0,20 a 0,40 cmol (+) 100 g⁻¹, y de Mg⁺², hasta 0,05 a 0,10 cmol (+) 100 g⁻¹. En el caso de los micronutrientes, anotan que generalmente, el B y el Zn son los que más frecuentemente pueden ser limitantes para las plántulas, y que la sintomatología visual de deficiencias en las plántulas, es un aspecto importante para direccionar la necesidad de fertilización con micronutrientes.

El mayor problema en vivero es la aparición de hongos que producen damping off por excesos de húmedas, o la presencia de hormigas del género *Atta*, por lo que deben tomarse las medidas correctivas adecuadas, como regulación del riego, aplicación de fungicidas cúpricos y control de hormigas con productos autorizados.

3.3 Preparación y envío

Una vez las plántulas están listas, se les empaca en bandejas de hasta 30 plántulas (en bolsas de polietileno de 4" x 6" o 4" x 8") o de 96 a 150 plántulas en "jiffys"; cada vivero define la cantidad y arreglos necesarios para garantizar la cantidad adecuada, de acuerdo al método de plantación seleccionado.

Las plántulas criadas en bolsa generalmente salen con una altura de 20 cm -30 cm, mientras que plántulas en jiffys pueden tener entre 10 cm y 30 cm. A menor altura de las plántulas, mayor exigencia con el control de malezas en el campo.

4. Establecimiento

4.1 Época de plantación

Las especies de eucalipto, al igual que otras especies, el establecimiento debe hacerse tan pronto se establecen las lluvias, para aprovechar toda la estación de crecimiento y asegurar el establecimiento de la plantación. En Costa Rica, normalmente, esta época inicia en mayo y se extiende hasta octubre, noviembre en algunas áreas (figura 1).

De manera general las áreas bajas del territorio nacional se prestan para el establecimiento de diferentes especies de eucaliptos, incluyendo las más conocidas en el país, *deglupta*, *saligna*, *camaldulensis* y *citriodora*.

4.2 Protección de las plantaciones

Las plantaciones de eucalipto, al igual que otras especies, son susceptibles a daños por el fuego (incendios forestales), el pisoteo y ramoneo de ganado y otros animales, así como ataques de insectos y enfermedades. Los sitios plantados deben protegerse mediante rondas cortafuegos y cercos que impidan el ingreso de animales; es necesario implementar labores de vigilancia permanente para evaluar posibles riesgos y daños. Es común, adicionalmente, el establecimiento de cercos, incluyendo la presencia de otras especies para proteger a las plantaciones recién establecidas.

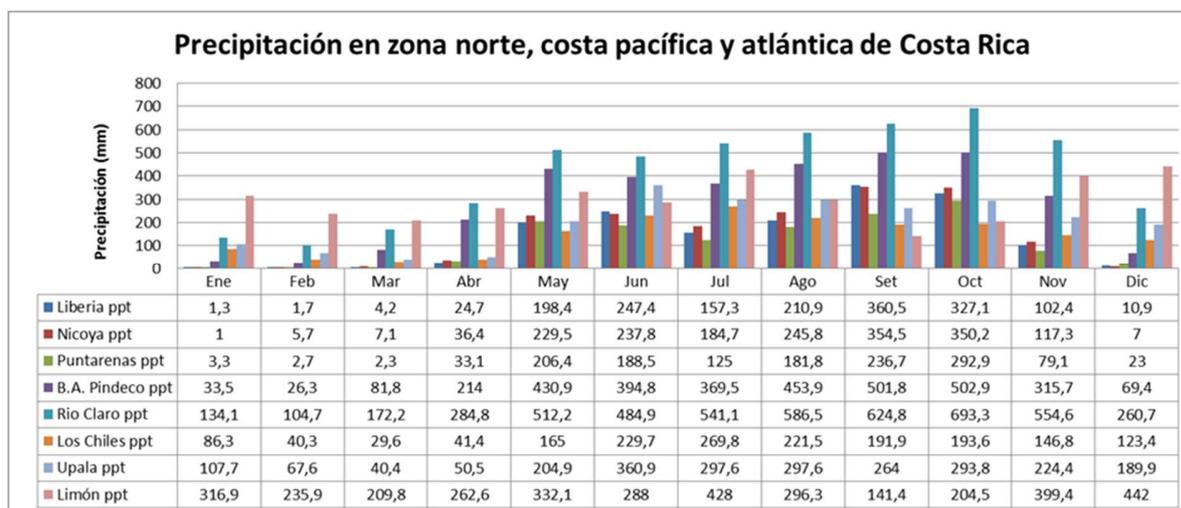


Figura 1. Distribución de la precipitación en zonas seleccionadas de Costa Rica (Fuente: IMN)

4.3 Selección del sitio y preparación del suelo

Las especies de eucaliptos, junto con las de pino, son ampliamente utilizadas en programas de plantación en América del Sur (Argentina, Brasil, Colombia, Chile, Uruguay, Paraguay, Venezuela) para la producción de madera para tableros (contrachapados, de partículas, MDF, etc.), astillas, madera, energía, postes y otros.

Las principales especies (*E. grandis*, *E. globulus*, *E. saligna* y otros) plantadas en América del Sur se establecen en bloques grandes de más de 100 ha, mientras en América Central las áreas de plantación generalmente son pequeñas, menores a 300 h en un solo bloque. Las diferentes especies de eucalipto, tiene requerimientos de suelo diferente, según su procedencia y adaptación a condiciones de crecimiento diferentes, aunque este disminuye para la mayoría de las especies cuando los valores de resistencia a la penetración son superiores a 20 kg cm⁻² (Dedecek *et al.* 2001).

Costa (1990), citado por Alvarado y Thiele (2012), informa de un trabajo en el que se muestra el efecto de la densidad aparente del suelo sobre el peso seco de plántulas de cuatro especies de eucalipto; aumentos en la densidad aparente causan una disminución del crecimiento de las cuatro especies; sin embargo, no siempre los mayores pesos correspondieron con los valores menores de densidad del suelo, ya que a veces un ligero aumento en esta variable puede reducir la pérdida de agua y con ellas nutrientes en solución. Lo anterior significa que densidades altas del suelo donde se establezca una plantación pueden afectar negativamente su crecimiento.

En Brasil, Gonçalves *et al.* (1990) encontraron una alta correlación entre el contenido de limo, materia orgánica y arcilla sobre la productividad de *E. saligna*. Otros autores (CATIE 1997a; CATIE 1997b; CATIE 1997c; CATIE 1997d; CATIE 1997e) encontraron que la topografía es importante para el eucalipto en cuanto a su efecto sobre la profundidad del suelo y el drenaje. Su crecimiento es pobre en suelos compactados por sobrepastoreo, calcáreos, suelos mal drenados y con poca humedad disponible en todo el año. Los mejores crecimientos se presentan en suelos franco-arenosos, con buen drenaje y con pH de neutro a ácido.

Cuadro 2. Peso seco (g) de la parte aérea de plántulas de especies de eucalipto a los 85 días de edad, en diferentes desidades aparentes del suelo.

Densidad aparente	Especies			
	g ml ⁻¹	<i>E. citriodora</i>	<i>E. grandis</i>	<i>E. paniculata</i>
0,85	7,42	4,96	5,76	1,36
1,00	6,31	3,42	4,11	1,05
1,07	6,68	3,71	6,21	1,03
1,14	7,25	3,19	4,35	100
1,21	2,25	2,28	2,57	156
1,28	3,37	2,51	2,94	0,46

Fuente: Costa 1990, citado por Alvarado y Thiele 2012

E. deglupta se adapta de manera natural y presenta tasas de excelente crecimiento en áreas a orillas de ríos libres de malezas, con excesivo suplemento de agua y bien drenadas. Sin embargo, al ser plantado tiene que competir con malezas, lo que disminuye la productividad y requiere realizar un buen control de malezas (Mackensen 1999). Durante las fases tempranas de crecimiento, *E. deglupta* no es capaz de competir exitosamente con la vegetación accesorio, y la tasa de mortalidad es consecuentemente alta, especialmente si no se realiza un adecuado mantenimiento de las plantaciones (Mackensen y Fölster 1999).

En Argentina se ha relacionado la disponibilidad de P en el suelo con la productividad de *E. grandis* en estos sitios (Aparicio y Lopez, 1995), en Ultisoles, Entisoles y Vertisoles arenosos; adicionalmente Mollisoles, Inceptisoles y Alfisoles en América Central (cuadro 3).

Cuadro 3. Condiciones generales para el crecimiento de eucaliptos en Costa Rica.

Crecimiento	Suelos	pH	Pendiente	Altitud	Precipitación	Meses secos	Temperatura
Adecuado	Ustolls, Ustalfs, Ustepts, Orthents	5,0 - 6,5	< 25	< 600	1500 - 2500	1 - 3	22 - 30
Mediano	Ustolls, Ustalfs, Ustepts, Orthents	4,8 - 6,5	25 - 30	500 - 800	1500 - 3000	1 - 3	22 - 32
Deficitario	sin restricciones	< 4,8	30 - 35	< 1500 o > 3000	< 1500	> 4	< 22

Fuente: elaboración personal con base en la literatura

Eucalipto se planta en una gran variedad de sitios, muchos relativamente secos, como crestas y partes altas de lomas, que son sitios no deseables (Spangenberg y Fölster 2002). Por otro lado, un exceso de agua en el suelo implica un menor contenido de oxígeno, tornando el ambiente poco adecuado para el crecimiento de las raíces de eucalipto. A pesar de que algunas especies presentan tolerancia a la deficiencia de agua, las observaciones de campo evidencian un crecimiento insatisfactorio de la mayoría de las especies plantadas (Barros y Novais 1990). Según Francis (1989) en Puerto Rico *deglupta* crece

bien en margas arenosas profundas y moderadamente fértiles, pero también crece en ceniza volcánica y suelos areniscos.

El cuadro 4 presenta los promedios de temperaturas máximas y mínimas en zonas seleccionadas de Costa Rica y la figura 2 la precipitación mensual y los días de lluvia en las mismas zonas.

Estas condiciones permiten estimar la existencia de 1.143.150 ha de zonas aptas para el cultivo de las diferentes especies de eucaliptos, a lo que se adicionarían 227.700 ha de áreas con condiciones medianas y 230.530 ha de zonas con limitaciones para el desarrollo de *E. deglupta*, *E. grandis*, *E. saligna*, *E. tereticornis*, *E. citriodora*, *E. cloeziana* y otras especies propias de zonas bajas.

Cuadro 4. Promedios de temperaturas máximas y mínimas mensuales en sitios de Costa Rica

	Liberia		Nicoya		Puntarenas		B.A. Pindeco		Río Claro		Los Chiles		Upala		Limón	
	t min	t max	t min	t max	t min	t max	t min	t max	t min	t max	t min	t max	t min	t max	t min	t max
Ene	20,7	33,4	22,5	33,8	23,7	30,2	19,3	31,9	21,1	32,3	20,8	29,9	21	29,2	20,7	28,9
Feb	21,2	34,4	22,7	35,3	24,2	30,9	19,1	33,1	21,4	33,2	20,5	30,9	20,7	30,5	20,7	29,1
Mar	21,6	35,4	23,4	36,1	25	31,5	19,9	33,5	21,9	33,6	20,6	32,6	20,9	31,8	21,3	29,7
Abr	22,7	35,9	24,1	36,6	25,3	30,8	21,1	32,4	22,5	32,8	22	33,8	21,7	33,2	22,0	30,1
May	23,4	33,9	24	34,5	24,7	29,9	21,3	31	22,4	31,8	22,8	32,9	22,6	32,6	22,8	30,4
Jun	23,2	32	23,5	33	23,9	29,2	21,2	30,5	22,2	31,4	23,1	31,7	22,9	31,5	22,9	30,3
Jul	22,8	32,1	23,3	32,9	23,6	29,1	20,9	30,3	22	31,2	22,9	30,8	22,8	30,7	22,6	29,6
Ago	22,6	32,1	23,3	32,8	23,7	29,2	20,9	30,5	21,9	31,3	23,1	31,5	22,7	31,2	22,5	30,1
Set	22,4	31,3	23,1	32,3	23,4	28,8	20,7	30,5	21,9	31,3	22,7	32,3	22,5	32,1	22,5	30,6
Oct	22,3	30,9	23	31,4	23,3	28	20,8	29,7	22	30,6	22,6	31,8	22,4	31,4	22,3	30,4
Nov	21,5	31,6	22,9	31,7	23,5	28,5	20,9	29,8	22,1	30,6	22	30,5	22,1	29,7	22,0	29,4
Dic	21	32,5	22,6	32,8	23,6	29,4	20,3	30,8	21,6	31,4	21,9	29,9	21,5	29	21,2	28,9

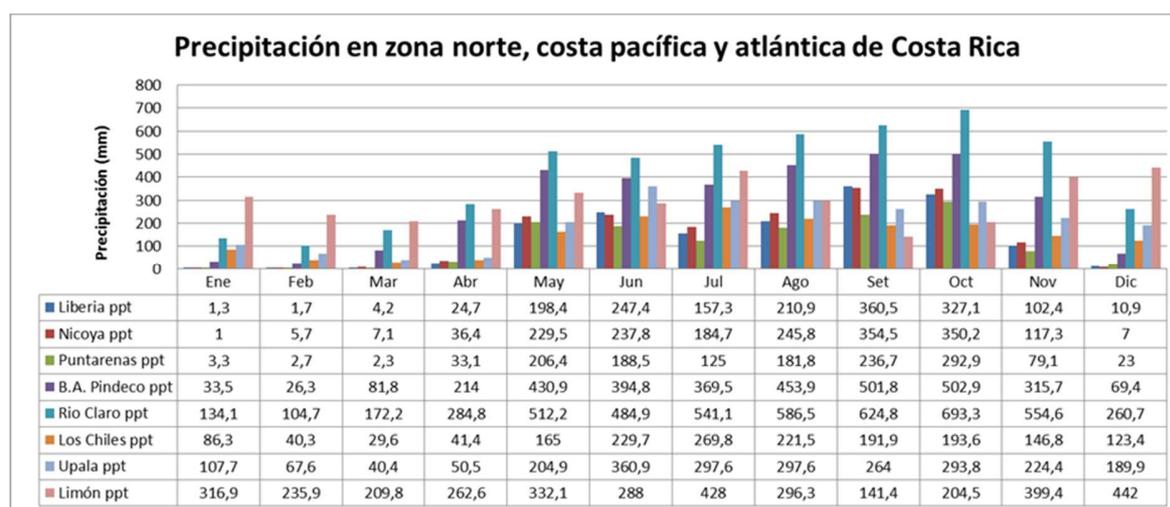


Figura 2. Precipitación y días de lluvia en sitios seleccionados de Costa Rica

Fuente: IMN http://www.imn.ac.cr/IMN/MainAdmin.aspx?__EVENTTARGET=LinksInfoClimatica

En la provincia de Entreríos y Corrientes, en Argentina, una porción importante de la productividad de *E. grandis* se define en la etapa de establecimiento de la plantación. Las técnicas de mayor impacto son la preparación del terreno, el control de malezas y la fertilización. La aplicación adecuada de cada una de ellas incrementa la productividad, mejora la homogeneidad y beneficia la sustentabilidad. Las plantaciones de *E. grandis* se distribuyen en una gama muy variable de suelos y unidades fisiográficas,

desde las lomas de suelos rojos arcillosos lateríticos del noreste de Corrientes (Alfisolos y Ultisolos), los cordones arenosos del centro y sudoeste de Corrientes (Ordenes Alfisolos y Entisolos), suelos arenosos de la costa del río Uruguay hasta franco arcillosos y arcillosos de las provincias de Entre Ríos y Corrientes (Entisolos, Alfisolos, Molisolos, y Vertisolos).

En la mesopotamia argentina, la preparación de suelo para la plantación tiene una gran influencia sobre el crecimiento del eucalipto a lo largo de la rotación. Asimismo, como los costos de estas tareas acumulan intereses a lo largo del ciclo productivo deben ser evaluados detenidamente.

El objetivo de la preparación del terreno es suministrar a las plantas las mejores condiciones para el desarrollo del sistema de raíces, con un buen acceso al agua y a los nutrientes. En los últimos años, ante la necesidad de reducir costos y disminuir la erosión, es cada vez más utilizada la preparación del terreno con rastra de discos sólo en la banda de plantación (Aparicio et. al 2014). La textura muy variable de los suelos destinados a plantaciones de *E. grandis* en la región y la posición en el paisaje marcan diferencias en la intensidad de las labores de preparación del terreno. Las labores de roturación (subsolar) tienen mayor efecto a medida que aumenta el porcentaje de arcilla debido a la mayor resistencia al crecimiento de las raíces y a la menor permeabilidad del agua.

En suelos arcillosos, asumiendo que la labranza profunda benefician el crecimiento, la tendencia es subsolar hasta 40-80 cm profundidad. Esta labor requiere un considerable aumento de potencia para su aplicación en comparación a la preparación superficial con rastras de discos. Sin embargo, estudios en suelos rojos arcillosos de Corrientes y del Sur de Misiones no evidenciaron diferencias en crecimiento al comparar dos profundidades de subsolar respecto a preparación con arado y rastra de discos (Aparicio et al.1995).

En América Central *E. camaldulensis* y *E. saligna* se pueden plantar en una amplia variedad de suelos sin necesidad de preparar el terreno (CATIE 1986; Martínez 1990; Martínez 1991; CATIE 1991). En el caso de suelos compactados por ganadería (principalmente ándicos) es necesario subsolar y sembrar en hoyos profundos y anchos (30x30x30 cm). En Oxisolos compactados, el utilizar equipos con un subsolador de una línea no es suficiente para corregir todo el problema y en el caso de utilizarse un aparato de tres líneas bajo condiciones de humedad inadecuadas, puede causarse más compactación después de un tiempo. En esta fase de preparación del suelo se debe realizar un análisis químico, con el propósito de definir el tipo de enmiendas que deben de aplicar de acuerdo a las limitaciones en contenidos de Ca, Mg, P (suelos altamente fijadores como los Andisolos) y acidez.

En América Central, se ha cultivado *E. saligna* en Inceptisolos con características ándicas (al presente Andisolos), Alfi solos y Ultisolos en alturas medias, mientras que el *E. camaldulensis* en suelos poco desarrollados, más pobres y de pisos altitudinales más bajos y secos, entre ellos Entisolos, Inceptisolos, Mollisolos y Alfi solos (Martínez 1991; CATIE 1991). En Colombia se menciona su cultivo en Inceptisolos ándicos sobre las cordilleras Central y Occidental (Cannon 1983).

4.3.1 Fertilización al trasplante

Ward et al. (1985), resumiendo lo encontrado por varios autores, mencionan que en esta etapa de crecimiento y hasta el cierre de copa de la plantación, la respuesta del eucalipto a la adición a de N

ocurre en muchas partes del mundo, la respuesta a la adición de P es rara y a K limitada. La respuesta a la adición de micronutrientes es aún más limitada, aunque se menciona que ocurre a la adición de Mg y Fe en suelos alcalinos y calcáreos, al B en el este y centro de África y Andisoles y Oxisoles de Suramérica.

Silveira et al. (2001) indican que en Brasil la fertilización al trasplante consiste en la aplicación de P, Cu, Zn, N y K; en América Central (CATIE 1991; Martínez 1990) se utiliza una fuente de fertilizantes con N, P y en Colombia (Cannon 1983) una base de N, P, K y B. Estudios realizados en Australia (Judd et al. 1996) demuestran que la fertilización inicial del eucalipto debe completarse antes de los 9 meses después del trasplante, con adiciones de fertilizante cada 12 meses y no después del tercer año.

Con una fertilización al trasplante se obtienen altas tasas de sobrevivencia y crecimiento rápido en altura, lo que permite un control temprano de malezas y un mayor crecimiento diamétrico y de volumen de madera. La experiencia en América Central indica que las mejores respuestas a la fertilización se obtienen aplicando entre 40 y 60 g por planta de fórmulas completa (12-24-12; 10-30-10) al momento del trasplante, lo que equivale a aplicar entre 6 a 24 g por planta de N y 8 g por planta de P.

Actualmente, las cantidades de fertilizante aplicadas en plantaciones de ciclo corto varían según el tipo de suelo, la especie y la producción objetivo. En Brasil distribuyen de 200 a 400 kg ha⁻¹ de superfosfato y 100 kg ha⁻¹ N:P:K 25:0:25 cuando las plantaciones llegan a su cuarto ciclo. Para siembras nuevas, luego de pasturas o vegetación secundaria, se utiliza sólo un NPK al fondo del hueco (Spangenberg y Fölster 2002).

En las Sabanas Orientales de Venezuela, Morales y Ortega (1980) midieron el efecto de aplicar al trasplante fosforita y las fórmulas 12-12-17-2 y 12-12-6 en dosis de 0, 100, 150 y 200 g por planta sobre el crecimiento de *E. grandis*; los autores concluyeron que las mejores respuestas en productividad se obtuvieron con la aplicación de 100 g por planta del fertilizante fosforita y que en esta localidad no es aconsejable intentar producir la especie sin aplicar fertilizante. Similares resultados encontró Cannon (1983) en Andepts en Colombia en cuyo caso los mejores resultados en crecimiento se obtuvieron con la aplicación de 100 g por planta de 10-30-10, con incrementos en 15 veces del volumen con respecto al testigo. Cannon (1983), también menciona que la aplicación de 5 g por árbol de B después de un año presenta mayores alturas que el testigo, aunque recomienda un seguimiento a la aplicación de este elemento ya que fácilmente puede incurrirse en problemas de toxicidad.

Según Barros y Novais 1996 (citados por Silveira *et al.* 2001), las aplicaciones de Ca deben ser en cantidades suficientes para suplir la demanda del cultivo en el ciclo de producción, lo cual se podría lograr con dosis de 1 a 2,5 t ha⁻¹ de dolomita. Para el caso del P éstos mismos autores recomiendan su aplicación, especialmente cuando los suelos tienen un pH (CaCl₂) menor a 5,0.

Los mejores crecimientos del *E. grandis* en Australia se registran en suelos francos profundos y húmedos, bien drenados de origen volcánico o aluvjal. Crece moderadamente bien en suelos arcillosos si éstos tienen buen drenaje. En su región de origen (Queensland y Nueva Gales del Sur), se lo encuentra principalmente en las partes bajas o de poca pendiente de valles fértiles con suelos profundos y bien drenados. En la Mesopotamia se lo ha plantado en un espectro de variación edáfica muy amplio que se presenta en el cuadro 4.

Los mejores suelos para *Eucalyptus grandis* en la región del Noreste de Entre Ríos son los arenosos pardos profundos (localmente llamados "mestizos"; orden Inceptisol y Molisol) con IMA Profundidad de suelo (cm) que pueden superar los 50 m³ha⁻¹año⁻¹. Sobre arenas rojizas profundas (orden Entisol) y suelos arcillosos (Vertisol), el incremento medio anual se reduce a valores de 33 y 26 m³ha⁻¹año⁻¹, es la falta de retención de humedad y la baja respectivamente. Los suelos mestizos tienen mayor fertilidad y mayor retención de humedad que los arenosos profundos, que tienen como limitaciones la baja retención de humedad y poca fertilidad (Aguerre *et al.* 1995).

Cuadro 4. Crecimiento de E. grandis en Argentina	
Tipo de suelo	Crecimiento medio anual esperado
Rojos profundos: Ultisol	45-50 m ³ ha ⁻¹ a los 10 años
Arenoso pardo profundo y arenosos rojizos con profundidad efectiva mayor a 60 cm: Entisol	40 - 45 m ³ ha ⁻¹ a los 10 años
Arenoso pardo con profundidad efectiva alrededor de 30 cm: Inceptisol	30 - 35 m ³ ha ⁻¹ a los 10 años
Arenosos de baja fertilidad, profundidad alrededor de 60 cm o mas: Brunizem arenoso	25 - 30 m ³ ha ⁻¹ a los 10 años
Vertisol arenosos	20 - 25 m ³ ha ⁻¹ a los 10 años
Fuente: Aguerre et al. 1995	

En América Central *E. camaldulensis* se adapta a una gran cantidad de suelos, desde relativamente pobres hasta periódicamente inundables, pero los suelos sobre-pastoreados y compactados no permiten el desarrollo de la especie, así como suelos con poca humedad disponible; *E. citriodora* prefiere suelos bien drenados, sueltos, de los órdenes inceptisol y alfisol, sin presencia de capas endurecidas; *E. deglupta* es una especie exigente, que requiere suelos húmedos pero bien drenados, franco arenosos profundos y con buena fertilidad, libres de malezas, especialmente gramíneas sin capas endurecidas; *E. grandis* prefiere suelos profundos, bien drenados, con buena fertilidad natural y es sensible a las deficiencias de boro, mientras que *E. saligna* utiliza suelos limosos o arcillosos, moderadamente fértiles, húmedos pero no inundables, de origen volcánico, mientras que *E. tereticornis* puede crecer en suelos ácidos (CATIE 1986; CATIE 1991; Martínez 1991).

5. Manejo

5.1 Densidad de plantación

Uno de los factores más fácilmente manejables por el productor es la densidad de plantación. La densidad tiene una relación directa con los costos de establecimiento, los costos de mantenimiento y la calidad y cantidad de producto a obtener.

En el sur de América del Sur las densidades más frecuentes varían entre 1000 y 1100 árboles por hectárea (distanciamientos de 4,0 m x 2,5 m y 3,0 m x 3,0 m) hasta menores densidades (816 y 625 árboles ha⁻¹, en espaciamientos de 3,5 m x 3,5 y 4,0 m x 4,0) en rotaciones de 10-12 años para la producción de madera para aserrío, tableros, enchapados y otros usos con especies de *E. grandis*, *E. salina*, *E. globulos*, *E. citriodora*, *E. camaldulensis*, principalmente.

Densidades altas producen mayor cantidad de biomasa, pero fustes más delgados; aumenta la poda natural, la mortalidad natural y el número de plantas dominadas y se hace una utilización más intensiva del sitio. Si el objetivo es la producción de madera para aserrío, el turno se alarga, para obtener diámetros aserrables. Para compensar las pérdidas de crecimiento individual de los árboles se hace necesario el uso de prácticas de silvicultura intensiva como fertilización, raleos, podas.

En América Central se han utilizado diferentes espaciamientos, desde altas densidades (2500 árboles ha⁻¹) para la producción de leña y puntales para bananos con *E. camaldulensis*, espaciamientos más amplios (3,0 x 3,0 m para producción de madera con *E. citriodora*, *E. deglupta* y *E. grandis*, hasta espaciamiento de 5,0 m x 4,0 m o 5,0 m x 3,0 m en asocio con café con *E. deglupta*, *E. saligna* o *E. tereticornis*.

La densidad inicial elevada reduce la altura media (no la altura dominante), el diámetro medio, el tamaño de las ramas y la conicidad e incrementa el área basal media ha⁻¹, y, como ya se dijo, el volumen total, aunque no necesariamente el volumen aserrable. Si el objetivo de producción es la obtención de madera aserrable, convienen las densidades bajas y la adopción de un programa de podas, para disminuir la presencia de nudos.

5.2 Control de malezas

La mayoría de los eucaliptos son altamente susceptibles a la competencia por las malezas, tanto gramíneas como latifoliadas, siendo imprescindible el control durante el primer año de establecimiento para asegurar la supervivencia y el buen desarrollo de la plantación.

El control de malezas, como con otras especies forestales y en silvicultura intensiva, se hace en forma manual o mecánica (uso de moto-guadañas y capeadoras mecánicas, aunque en el pasado se han utilizado diferentes herbicidas (especialmente con base en glifosato o paraquat y otros). El uso de los mismos ha venido en desuso por el daño al ambiente, aunque el control eficiente de malezas puede mejorarse con el uso de los mismos.

Normalmente los herbicidas más utilizados son los hechos a base de glifosato. El uso de agroquímicos debe cumplir con las regulaciones nacionales, y las operaciones certificadas deben atender a las regulaciones de su organismo certificador.

5.3 Fertilización

Reis y Barros (1990) indican que la cantidad de nutrimentos que se remueven en plantaciones de eucalipto depende de factores como la especie, la densidad de la plantación, la densidad de corta, la calidad de sitio y el componente del árbol que se exporta.; en general, se exporta más nutrimentos de una plantación de eucalipto cuanto más grande sea la cantidad de producto extraído y, entre los

diferentes factores que afectan la pérdida de nutrimentos, lo absorbido causa la mayor remoción de nutrimentos del ecosistema (cuadro5). La variación en la cantidad de nutrimentos exportado por diferentes especies, puede ser el resultado de la distribución o utilización de nutrimentos, la cantidad de biomasa producida y/o su capacidad de absorción (coeficiente de utilización biológica *E. citriodora* 143, *E. urophylla* 152, *E. saligna* 173, *E. grandis* 182, *E. cloeziana* 224).

De acuerdo con Alvarado y Thiele (2012), en sitios, donde el suelo es deficiente en un elemento específico, la exportación de este puede ser más relevante que la del total de nutrimentos. En este caso, la especie o genotipo a utilizar en el sitio debe ser aquella con la menor eficiencia para el nutrimento en cuestión. *E. citriodora* es más exigente en K que otras especies como *E. saligna*, con un 26% y un 14% de K en las hojas respectivamente, por esta razón, la utilización de *E. citriodora* para extracción de aceites esenciales significa una fuente de pérdidas de reservas de K en el suelo.

Si se considera el Ca, *E. saligna* concentra mucho más este nutrimento en la corteza, mientras que *E. citriodora* inmoviliza más cantidades de este nutrimento en la madera, los datos incluidos permiten observar la gran cantidad del Ca que se asocia a la corteza del fuste, por lo que la devolución de este componente de la biomasa al ecosistema sería de suma relevancia económica y ecológica (cuadro 6). En sitios con mayor capacidad productiva, la cantidad absoluta de nutrimentos exportados de manera general es más elevada, exportación ligada a una mayor productividad de las especies.

Cuadro 5. Biomasa y coeficiente de utilización biológica (CUB) de nutrimentos en fuste de eucaliptos en Brasil								
Especie	Edad (años)	Biomasa fuste t ha ⁻¹	N	P	K	Ca	Mg	CUB
			kg ha ⁻¹					
<i>Eucalyptus saligna</i>	10	72	115	20	90	130	30	187
<i>E. saligna</i>	9	122	148	36	90	216	75	216
<i>E. saligna</i>	8	111	294	19	157	238	58	145
<i>E. saligna</i>	8	262	660	34	427	402	162	155
<i>E. saligna</i>	8	106	218	28	176	186	42	163
<i>E. citriodora</i>	10	108	195	20	196	380	75	125
<i>E. citriodora</i>	9	117	170	44	169	190	90	176
<i>E. citriodora</i>	8	77	261	13	122	247	71	108
<i>E. citriodora</i>	8	284	635	26	513	400	184	162
<i>E. grandis</i>	9	132	338	15	97	208	78	179
<i>E. grandis</i>	8	163	465	25	235	260	45	158
<i>E. grandis</i>	8	90	211	14	97	172	33	171
<i>E. grandis</i>	8	396	808	30	554	564	228	181
<i>E. grandis</i>	7	161	220	9	180	600	65	150
<i>E. grandis</i>	7	112	90	6	70	340	30	209
<i>E. grandis</i>	6	72	185	15	117	115	26	157
<i>E. grandis</i>	5	28	49	3	20	27	7	264
<i>E. cloeziana</i>	8	102	246	12	76	64	38	234
<i>E. cloeziana</i>	8	215	507	15	158	181	143	214
<i>E. urophylla</i>	9	154	282	45	161	414	108	152

CUB = Unidad de biomasa producida/Σnutrimentos absorbidos
Fuente: Reis y Barros (1990) citados por Alvarado y Thiele (2012)

Cuadro 6. Contenidos de K y Ca en componentes de biomasa de *E. saligna* y *E. citriodora* en plantaciones de 8 años de edad en Brasil

Especie	Biomasa	Elemento	Componentes del árbol				
			Madera	Corteza	Ramas	Hojas	Total
	t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹					
<i>E. saligna</i>	291	K	329	99	31	75	534
		Ca	75	327	56	55	513
<i>E. citriodora</i>	325	K	382	131	73	205	791
		Ca	137	263	63	47	510

Fuente: Tomado de Reis y Barros (1990), citados por Alvarado y Thiele (2012)

El aumento en la densidad de plantación implica una mayor producción de biomasa en las primeras etapas de crecimiento, produciendo, por tanto, una exportación mayor de nutrimentos (cuadro 7). Sin embargo, la experiencia muestra que cuando las especies forestales tienden a ocupar el sitio, la cantidad de biomasa y nutrimentos absorbidos tienden a ser iguales a las más densas.

Cuadro 7. Biomasa y contenido de nutrimentos en la parte aérea de *E. grandis* y *E. saligna* de 3,5 años de edad, en dos densidades de plantación

Especie	Densidad	Biomasa	N	P	K	Ca	Mg
	arb ha ⁻¹	t ha ⁻¹	kg ha ⁻¹				
<i>E. grandis</i>	5000	78	306	11	69	71	23
	1667	43	203	8	51	46	17
<i>E. saligna</i>	5000	66	187	10	97	63	21
	1667	50	258	3	81	60	25

Fuente: Tomado de Reis y Barros (1990), citados por Alvarado y Thiele (2012)

En suelos de baja fertilidad del Brasil (Oxisoles) con el aumento de la demanda de madera y métodos más intensivos de manejo de las plantaciones (mecanización del suelo, aumento de la densidad de plantación, fertilización y reducción de la edad de corte), se nota que a pesar de la aplicación de fertilizantes minerales, las cantidades que se adicionan son muy inferiores a las que salen de la plantación, lo que lleva a una reducción de la productividad forestal en función de un agotamiento gradual del suelo.

Al estudiar la cantidad de nutrimentos exportados como madera de *E. grandis* de 7 años de edad en Brasil, Haag (1983), citado por Alvarado y Thiele (2012), menciona que el total exportado del total absorbido es alto, siendo el macro elemento Mg el que más sale del sistema y en orden decreciente P>Ca>K>S>N. En cantidad total exportada, el Ca fue el que más salió del sistema y en orden decreciente N>K>S>Mg>P. Dentro de los micronutrimentos, el Mo es el elemento que más se exporta del total absorbido, aunque los más exportados siguen el orden decreciente Mn>Fe>B>Cu>Zn>Mo.

Los factores que conducen a que una especie absorba mayor o menor cantidad de nutrimentos son complejos. Se puede decir que una especie que absorbe mayor cantidad de nutrimentos por unidad de biomasa producida de otra que absorbe una cantidad menor, así se puede decir que *E. saligna* y *E. citriodora* son más exigentes en N, P y K que *E. grandis* (cuadro 8) y que *E. citriodora* es particularmente exigente en K. También podría decirse que *E. cloeziana* es la especie menos exigente en nutrimentos, a excepción del Mg, para el cual no difiere de las demás especies. Si se considera la absorción media

anual, se verifica que para N, los valores varían de 83 kg año⁻¹ para *E. cloeziana*, hasta 164 kg año⁻¹ para *E. grandis* y que para P estos valores son de 2,6 y 6,7 kg año⁻¹ respectivamente.

Cuadro 8. Nutrientes por cantidad de biomasa de la parte aérea de especies de eucalipto de 8 años de edad en Brasil							
Especies	Biomasa t ha ⁻¹	Nutrientes					Total nutrientes kg ha ⁻¹
		N	P	K	Ca	Mg	
		kg t ⁻¹ biomasa					
<i>E. grandis</i>	448,3	2,92	0,12	1,68	1,73	0,77	3240
<i>E. saligna</i>	291,3	3,19	0,16	1,82	1,76	0,78	2249
<i>E. cloeziana</i>	231,5	2,87	0,09	0,91	1	0,76	1303
<i>E. citriodora</i>	325,1	3,19	0,14	2,43	1,57	0,75	2627

Fuente: tomado de Reis y Barros (1990) citado por Alvarado y Thiele (2012)

Normalmente, la tasa de absorción es mayor en las edades más jóvenes de la plantación con un máximo que coincide con la mayor tasa de productividad. Para *E. grandis*, la tasa máxima de acúmulo de biomasa y de absorción de algunos nutrientes ocurre a la edad de 48 meses; a partir de esta edad se reduce la tasa de acúmulo (cuadro 9).

Cuadro 9. tasa de acumulación de biomasa total (parte aérea y raíces) y absorción de nutrientes en plantaciones de <i>E. grandis</i> de diferentes edades						
Edad meses	Biomasa t ha ⁻¹	Nutrientes				
		N	P	K	Ca	Mg
		kg ha ⁻¹ año ⁻¹				
12	9,6	85	6	52	36	11
24	17,3	117	8	67	40	14
36	17,7	105	7	65	39	14
48	22,5	81	6	52	38	13
60	18,4	70	5	43	31	11
72	16,1	61	4	35	27	10

Fuente: tomado de Reis y Barros (1990) citado por Alvarado y Thiele (2012)

La distribución de la biomasa y de los nutrientes en los diferentes componentes de la planta es de mucha importancia en la determinación de la edad de corta y del componente del árbol a ser extraído, de manera que se pueda minimizar la exportación de nutrientes; adicionalmente, el conocimiento de la composición de las partes de los árboles permite definir la estrategia de restitución a los suelos sobre los que crecen las plantaciones.

Tanto en Brasil como en los demás países, la explotación forestal consiste en retirar del terreno solamente el fuste (madera y corteza o solamente el fuste, cuando se descortezan los fustes antes de extraer la madera) dejando entonces en el terreno la copa (hojas y ramas) y las raíces. En plantaciones jóvenes la contribución de la biomasa de la copa es elevada y debido a que la concentración de nutrientes en las hojas también es más alta (más del 50% de los nutrientes se encuentran en la parte aérea), la contribución de nutrientes de esta fracción es considerable, por lo que una práctica adecuada es la distribución de hojas, ramillas y cortezas en la superficie, para facilitar la restitución de nutrientes al suelo.

A pesar de lo recomendable que es dejar la corteza de los árboles cortados en el sitio, donde sirve como mulch, cubre el suelo, reduce la erosión y ayuda a mantener la humedad del suelo, esta resulta ser una práctica de alta dificultad técnica en eucalipto (Spangenberg y Fölster 2002).

Según Reis y Barros (1990), los primeros estudios sobre el reciclaje de nutrientes en plantaciones de eucaliptos se iniciaron en Australia en 1977 y en Brasil en 1976, obteniendo los siguientes resultados:

- i. Antes del cierre de copas, el reciclaje se caracteriza por una demanda elevada de nutrientes para la formación de la copa sin que haya retorno por caída de hojas; en esta fase se esperan las mejores respuestas a la fertilización dado que las necesidades nutricionales de los árboles dependen de la disponibilidad de nutrientes;
- ii. Después del cierre de la copa, son más importantes los ciclos biogeoquímicos y bioquímicos, pues en esta etapa domina la descomposición de material orgánico depositado en el suelo y ocurre la redistribución interna de los nutrientes; en este estadio puede ocurrir algo de inmovilización biológica de P y N, lo cual puede causar una deficiencia de estos nutrientes en el estadio tres. Este estadio puede no alcanzarse a plenitud en suelos muy pobres, es decir, que solamente una porción muy pequeña de las necesidades nutricionales de la planta sean satisfechas por el reciclaje biogeoquímico, lo que implicaría la necesidad de provisión adicional de nutrientes (mediante fertilización).
- iii. A menudo, puede observarse una merma del crecimiento de eucalipto a los tres o cuatro años de plantado, proceso que se reinicia al quinto o al sexto año cuando se liberan los nutrientes anteriormente inmovilizados en los residuos en plantaciones previamente fertilizadas.

Alvarado y Thiele (2012) indican que en Brasil, se encontró que una plantación adulta de eucalipto puede depositar anualmente sobre el suelo cantidades importantes de residuos mientras que sus raíces extraen grandes cantidades de nutrientes del subsuelo, favoreciendo así su reciclaje. En un estudio con plantaciones de *E. citriodora* de 24 años de edad, Haag (1983) encontró que la cantidad de nutrientes asociada al mantillo de dicha plantación fue de 212 kg N ha⁻¹, 8,91 de P, 31,4 de K, 161,0 de Ca, 33,0 de Mg, 32,7 de S, 0,6 de B, 0,2 de Cu 25,2 de Fe, 14,7 de Mn y 0,9 de Zn, en un total de 2,87 y 17,11 t ha⁻¹ de mantillo en la capa superior e inferior, respectivamente. Dedeczek *et al.* (2001) mencionan que la cantidad de residuos recolectados antes de la cosecha en plantaciones de *E. grandis* de doce años sobre un Oxisol arenoso, fue de 19,8 t ha⁻¹, valor que se redujo a 2,64 t ha⁻¹ una vez efectuada la cosecha y la nueva plantación; en otra plantación de 7 años los valores fueron de 31,3 y 7,6 t ha⁻¹, antes y después de la cosecha, en un Oxisol de textura media.

Se ha mencionado en diferentes países que la quema “es un método muy barato y muy utilizado para la primera limpieza del sitio a plantar. El objetivo de la misma es la quema de residuos de cosecha (si se trata de reforestación) o de vegetación competitiva (malezas herbáceas y leñosas). Permite también reducir el stock de semillas de malezas en el suelo y liberar nutrientes no disponibles de la materia orgánica; asimismo, acorta los tiempos necesarios para el logro de un barbecho adecuado. La quema facilita el trabajo de los tractores para la labranza mecánica (subsulado, rotovator, etc.) y uniforma la cobertura de herbáceas anuales y perennes para el cultivo químico posterior” (Dalla Tea y Larocca 1998). Sin embargo, en Brasil se encontró que quema reduce en casi 3 veces la cantidad de residuos

orgánicos en plantaciones de *E. pilularis* de 6 años y elevó la pérdida de Ca y Mg casi en 38 y 15 kg ha⁻¹ respectivamente, ya que el proceso de convección de los vientos retira la ceniza del lugar de la quema.

En un trabajo de quema controlada en plantaciones mixtas, *E. pauciflora*, *E. dives* y *E. delegantensis* se encontraron los siguientes rangos de pérdida en kg ha⁻¹ 74 a 109 de N, 1,96 a 3,04 de P, 12,1 a 21,0 de K, 18,7 a 27,7 de Ca y 4,9 a 9,7 de Mg (Reis y Barros 1990). En plantaciones de eucalipto de 7 años de edad en Oxisoles de Brasil, se encontró que cuando los residuos de cosecha se queman o se retiran del ecosistema, ocurren variaciones grandes en la temperatura y contenido de humedad de suelo (2-5 cm de profundidad), en contraposición a lo que ocurre cuando se dejan sobre el suelo. La remoción de los residuos también causó un efecto adverso sobre el crecimiento de las plántulas hasta los 15 meses después del trasplante; en general, la corta y no remoción de los residuos de cosecha tienen un efecto positivo sobre el crecimiento, mientras que la quema de los residuos estimula aún más el crecimiento debido a la liberación rápida de los nutrientes en los tejidos quemados. En este tipo de plantaciones, se depositan 7,7 t ha⁻¹ (59% hojas y 41% ramas), cantidad que contribuye con 42 kg N ha⁻¹, 2,3 de P, 20 de K, 47 de Ca y 14 de Mg, adición que ocurre en un 50% en los primeros 10 meses y llega a alcanzar valores del 80% después de 23 meses (Gonçalves *et al.* 1998).

Bellote *et al.* (2001) encontraron que en plantaciones de 7 y 12 años de *E. grandis* creciendo en Oxisoles de Brasil, del total de la biomasa, las hojas representan el 9%, las ramas el 7% y el tronco el 83%, mientras que el 37% del total de nutrientes absorbidos se encuentra en las hojas, el 10% en las ramas y el 53% en el tronco; además, se encontró que la albura en las plantaciones de 7 años es mayor que el duramen, mientras que a la edad de 12 años los contenidos de ambos componentes de la madera son similares y representan el 86% de la biomasa aérea total. Los autores consideran que del total de la biomasa el 92% se encuentra en el fuste y que de un total de 302 t ha⁻¹ cosechada, se exportan 296 t ha⁻¹ o su equivalente de 277 t ha⁻¹ como madera comercial, lo que implica que la remoción de nutrientes del suelo debe ser repuesta con la adición de fertilizantes.

Ante la pregunta de cómo el eucalipto suele lograr grandes crecimientos a pesar de plantarse en suelos de baja fertilidad, de Paula (1996), cita a Attwill (1980) quien menciona que cerca de la mitad del fósforo es suplido por el ciclo interno o bioquímico, a través de un proceso efectivo de removilización de fósforo de las hojas senescentes. Cita igualmente a Baker y Attwill (1985), quienes también observaron ese aspecto. Ellos encontraron que para eucalipto, apenas el 4% de la demanda de N y el 10% de la demanda de P vienen de la reserva del suelo, el resto es suplido por el ciclo bioquímico. En contraste, los valores para pino rondan el 23% y el 34% respectivamente.

5.3.1 Deficiencias nutricionales

La falta o exceso de uno o más nutrientes producen anomalías visibles en las plantas (clorosis, muerte de tejidos y reducción del crecimiento). Estos síntomas son específicos para cada nutriente y una vez que se presentan, el crecimiento de las plantas ya está comprometido. Cuando el elemento es móvil (N, K, Mg, P) los síntomas se manifiestan en los tejidos más viejos; mientras que si los elementos son poco móviles (Ca, B, Zn, Fe, Mn) los síntomas se manifiestan primeramente en las hojas y brotes más nuevos. El cuadro 10 presenta la descripción de los síntomas de deficiencias mostrados por las hojas de los eucaliptos.

Cuadro 10. Síntomas de deficiencias nutricionales mostradas por hojas de árboles del género *Eucalyptus*

N	Inicialmente las hojas viejas presentan una coloración verde clara que se va tornando amarillenta y con pequeños puntos rojizos a lo largo de la lámina. Posteriormente los puntos cubren todo la lámina tornándose la hoja completamente rojiza.
P	Los síntomas de deficiencias de fósforo en <i>E. grandis x E. urophylla</i> se inician con una coloración verde oscura, tornándose rosada en la parte próxima a las nervaduras y con puntuaciones oscuras a lo largo de la lámina. En un estado final las puntuaciones se tornan necróticas
K	En <i>E. pilularis</i> inicialmente las hojas presentan una clorosis, seguida de una necrosis del borde de las hojas, la clorosis (rojiza) progresa de los bordes hacia el centro de la hoja. En la fase final muchas veces ocurre secamiento de la punta de las hojas.
Ca	En <i>E. grandis x E. urophylla</i> las hojas nuevas se deforman seguidas de un enrollamiento de las mismas. Algunas veces puede ocurrir muerte de las yemas apicales y en estados avanzados puede ocurrir secamiento de los brotes.
Mg	Las hojas más viejas presentan manchas amarillas con las nervaduras verdes. Luego las manchas se tornan color marrón de tamaño y contornos variables pudiendo también ocurrir clorosis intervenales.
S	Las hojas nuevas en <i>E. urophylla</i> se tornan amarillas de forma uniforme.
Fe	En <i>E. grandis</i> las hojas nuevas presentan clorosis intervenal con apariencia de un retículo fino.
Zn	En <i>E. grandis</i> las hojas nuevas se tornan lanceoladas, angostas y pequeñas. En la región apical ocurre una alta brotación de yemas con posterior pérdida de dominancia. Con esta condición los árboles crecen menos.
B	En <i>E. grandis</i> ocurre alta brotación y pérdida de dominancia causada por la muerte de yema apical. Las hojas nuevas presentan una intensa clorosis marginal seguida de secamiento de los márgenes. Las nervaduras se tornan extremadamente realzadas con posterior necrosis. En estados avanzados se observa muerte de puntas de ramas con muerte descendente y alta brotación de yemas laterales y bifurcación del tronco.
Mn	Las hojas nuevas presentan clorosis intervenales con apariencia de un retículo grueso, o sea las nervaduras y áreas adyacentes se tornan verde oscuro y el resto de la lámina foliar permanece verde claro.

Fuente: tomado de Silveira *et al* (2001) citado por Alvarado y Thiele (2012).

5.3.2 Efecto de la fertilización al trasplante

El efecto de la fertilización al trasplante ocurre casi inmediatamente después de su aplicación y disminuye hasta el cuarto año después de la misma (Martínez 1990); por lo tanto, la duración del efecto benéfico de este tratamiento es corta y depende del nutrimento y del número de aplicaciones que se realicen. Debido a esta situación, en Brasil se recomienda continuar con una fertilización entre los 30 y 90 días y otra a los 6 o 9 meses después, con el propósito de proporcionar nutrimentos de alta movilidad en el suelo como el N, K y B (Silveira *et al.* 2001). La adición de fertilizantes a un suelo pobre con más de un nutrimento, resulta en un incremento del crecimiento y una mayor absorción de todos los nutrimentos por parte de la planta y no solo de los que se aplicaron. Por ejemplo, la aplicación de una tonelada de fosfato en una plantación de *E. grandis*, aumentó la absorción de P en un 131% y la de Ca en un 100%. La absorción de K y Mg aumentó en un 24 y 25% respectivamente, elementos que en otra

región aumentaron en un 122 y un 98% respectivamente con la aplicación del mismo tratamiento (Reis y Barros 1990).

La recomendación de adicionar N al trasplante, depende del contenido de materia orgánica del suelo (0-20 cm de profundidad); Gonçalves *et al.* (1995) sugieren aplicar 60, 40 y 20 kg ha⁻¹ de N cuando los contenidos de materia orgánica oscilan entre 0-15, 16-40 ó más de 40 g dm⁻³, respectivamente; también recomiendan adicionar entre 30 y 40% en una primera ocasión y entre 60 y 70% en otra segunda oportunidad. En Colombia, Kane *et al.* (1992), después de realizar investigaciones por tres años con fertilizantes NPK en suelos volcánicos, concluyeron que la mejor dosis de N, P y K para fertilizaciones posteriores al trasplante consisten en adicionar 150, 40 y 30 kg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente.

El eucalipto responde a la aplicación de K en suelos con contenidos de 0,2 a 1,0 mmol K dm⁻³ y no existe respuesta en suelos con contenidos mayores. Cuando se presentan respuestas, estas se dan con una estrecha relación Ca:Mg (< 1 unidad) o por los elevados valores de Ca + Mg en el suelo (> 8 mmol K dm⁻³). En el cuadro 11 Silveira y Malavolta (2000) presentan recomendaciones de aplicación de K en función del contenido de este nutrimento en el suelo.

Cuadro 11. Recomendaciones de fertilización potásica en Eucalipto según el contenido de potasio en el suelo				
Meses después de la plantación	Forma de aplicación	K intercambiable (m mol dm ⁻³)		
		0,0-1	1,0 - 1,5	> 1,5
		K ₂ O (kg ha ⁻¹)		
2 - 3	En corona o banda a 30 cm del árbol	20-30	20-30	20-30
6 - 9	En corona o banda a 30 cm del árbol	30-45	20-30	
12 - 18	En banda entre hileras o toda el área	60-75		
Total aplicado		120-150	40-60	20-30

Fuente: tomado de Silveira y Malavolta 2000, citados por Alvarado y Thiele (2012)

Según Morais (1999) citado por Silveira *et al.* (2001), la dosis de boro a aplicación depende del tipo de suelo y varía entre 6 y 9 kg ha⁻¹. La dosis total se debe distribuir de manera que el 30 % se adicione en la primera re-fertilización y 70% en la segunda; también se recomienda elevar la dosis en un 25 a 30% en suelos con déficit hídrico. Finalmente las fertilizaciones de corrección y mantenimiento se hacen posteriores a las llamadas re-fertilizaciones. Esta es una labor que se realiza entre los 12 y 18 meses y consiste en identificar aquellas plantas que tengan un bajo crecimiento para hacer diagnóstico de su condición nutricional (Silveira *et al.* 2001). Para el diagnóstico se debe de reconocer si existen síntomas de deficiencia o toxicidad, hacer análisis de suelos y análisis foliares.

5.4 Respuesta a la fertilización

5.4.1 Respuesta del *Eucalyptus grandis*

(tomado de Alvarado y Thiele 2012)

Esta especie de eucalipto se utiliza ampliamente en el Valle del Cauca, Colombia (principalmente Andisoles) y en las sabanas brasileras y venezolanas (principalmente Ultisoles y Oxisoles), regiones

donde se ha generado la mayor parte de la información disponible en América Latina, así como en grandes extensiones de terreno en África y Australia.

En general, las variables físicas del suelo deben considerarse al momento de escoger los sitios para sembrar eucalipto, ya que en casos extremos pueden afectar negativamente el desarrollo radical de los árboles, más que las propiedades químicas del mismo; dentro de estas variables deben mencionarse la textura, la estructura, la disponibilidad de agua y la profundidad efectiva. Después de 21 semanas de establecidas en el campo, las plántulas de *E. grandis* en suelos con densidad aparente superior a $1,2 \text{ g cm}^{-3}$, tuvieron una altura promedio de 60,4 cm, mientras que cuando la densidad aparente fue de 1,4, 1,5, 1,6 ó $1,8 \text{ g cm}^{-3}$ las alturas promedio fueron 38,3, 25,0, 26,0 y 15,8 cm, respectivamente (Vélez 1981).

Las plantaciones de *E. grandis* y sus híbridos son de las más productivas del mundo tropical y subtropical, rendimientos que dependen de una fuerte absorción y reciclaje de nutrimentos. Varios estudios mencionan que la especie responde a la adición de P y puede mejorarse cuando además se aplica N y con la adición de fertilizante se han logrado incrementos de 25 y $98 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en rotaciones de 10 años en África del Sur, de $109 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ con la adición a la siembra de 53 y 30 kg ha^{-1} después de 6,5 años en Brasil y de $142 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ a los 9,25 años de aplicar el fertilizante y controlar malezas e insectos en Australia.

La respuesta en crecimiento de *Eucalyptus spp.* a la fertilización con la aplicación con N y P al inicio de la plantación ha sido reportada en Australia, Brasil, Fiji, Marruecos, Colombia, Portugal y Sudáfrica; por el contrario, la respuesta a la aplicación de K es poco mencionada, excepto cuando el contenido del elemento en el suelo está por debajo del nivel crítico (Morales y Ortega 1980; Kane *et al.* 1992).

Desde el punto de vista de fertilidad de suelos, variables como el pH, el contenido de materia orgánica, el nivel de P disponible, el contenido total de N, los contenidos de Ca, Mg y K intercambiables medidas a una profundidad de 0-20 cm son las variables que en orden descendente se citan con mayor frecuencia afectando el crecimiento de este género en Ultisoles y Oxisoles (Gonçalves *et al.* 1990).

Cromer *et al.* (1993) mencionan que la respuesta al P se presenta principalmente en suelos viejos muy meteorizados, mientras que la respuesta al N ocurre en suelos relativamente recientes bajos en su contenido de materia orgánica. Los incrementos en biomasa de *E. grandis* se deben que los árboles aumentan su índice de área foliar, lo que les permite interceptar una mayor cantidad de la radiación solar disponible; la ganancia en biomasa ocurre en construir más follaje (mayor fijación de carbono), a la forma en que el follaje se acomoda para interceptar la luz, así como la mejora de la eficiencia de asimilación del follaje. Cuando los árboles están deficientes de N, el efecto de la adición de N se nota en el aumento de su biomasa foliar, si los árboles están altos en N, el aumento en área fotosintética específica es más importante.

Por el contrario, si los árboles están deficientes de P los cambios en crecimiento se notan como una mejora en el efecto de asimilación, mientras que los árboles altos en P mejoran su área foliar específica y su capacidad de asimilación. En un ensayo en varias localidades al que se le adicionaron 1.536 y 461 kg ha^{-1} de N y P en Paleudalfs de Australia, los autores encontraron respuestas altamente significativas y sustanciales con la aplicación de estos elementos (cuadro 12).

Cuadro 12. Respuesta de <i>E. grandis</i> a la fertilización en Australia				
Tratamiento	Altura media (m)	Área basal (m ² ha ⁻¹)	IMA vol m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹	Pro. Primaria neta t ha ⁻¹ año ⁻¹
Sin fertilizante	5,81	3,42	6,1	7,63
Con fertilizante	14,45	17,33	34,2	27,1
Adaptado de Cromer et al 1993				

Los autores (Cromer *et al.* 1993) también encontraron que *E. grandis* crece rápidamente en sus estados iniciales, pero que este tipo de crecimiento solo ocurre cuando se suple los nutrimentos necesarios desde el suelo; una vez que cierra la copa, los incrementos en variables de crecimiento disminuyen, pero siempre son más elevados en los árboles fertilizados que en los que no reciben fertilización.

La siembra de *E. grandis* en suelos pobres de Venezuela, no puede realizarse sin la adición de fertilizantes, a pesar de las excelentes propiedades físicas de los suelos; bajo estas condiciones no solo es necesario aplicar NPKB, sino también Zn. Morales y Ortega (1980) encontraron que de 4 tipos de fertilizante comparados, la fórmula 12-12-17-2 causó el mejor crecimiento en diámetro y altura de los árboles, debido a la presencia de K y Mg, elementos que estaban en menores cantidades o ausente en los otros productos comparados (12-12-6 y fosforita); en este caso, la aplicación de 100 g árbol⁻¹ o su equivalente 137 kg ha⁻¹, fue el tratamiento más significativo en términos económicos y de crecimiento de la plantación. En suelos similares de Brasil, se recomienda la aplicación de 25 kg ha⁻¹ de N, 72 kg ha⁻¹ de P₂O₅ y 25 kg ha⁻¹ de K₂O (Gonçalves *et al.* 1990).

En general, se considera que esta especie no responde a dosis de P mayores a 100 kg ha⁻¹ como fertilizante de alta solubilidad, cuando se aplica al voleo (área total) o entre 1,0 y 1,5 t como roca fosfórica adicionada al hoyo; tampoco debe esperarse respuesta a la aplicación al voleo de menos de 30 kg N ha⁻¹. Por ejemplo la aplicación de 120 kg ha⁻¹ de NPK aporta 20 kg P y 18 de N, por lo que la respuesta esperada se deberá más a la adición de P que a la de N. En contraste, la respuesta a la adición de 500 kg de NPK ha⁻¹, la cual aporta 83 kg de P y 75 kg de N se debe más a la adición de N (Kane *et al.* 1992).

En el caso de Colombia, los suelos derivados de cenizas volcánicas presentan excelentes condiciones físicas, pero baja fertilidad, particularmente de P y B. En este tipo de ecosistema se acostumbra aplicar 70 g árbol⁻¹ de NPK (15-38-10) o de 60 g árbol⁻¹ de fosfato diamónico (18-46-0) + 10 g de bórax al inicio de la plantación y otra fertilización cuando se nota un bajo crecimiento o vigor 1 o 2 años después de la primera aplicación de fertilizante.

El abonamiento a la siembra es necesario para obtener el crecimiento inicial máximo y la segunda aplicación es necesaria para obtener el crecimiento máximo durante el turno de corta. La cantidad de N y P adicionada a la siembra proporciona cantidades bajas de estos elementos, las cuales tienen un efecto residual no mayor a 2 años, mientras que el efecto residual de la segunda fertilización puede alcanzar hasta 4 años, cuando se aplican 100 kg ha⁻¹ de la fórmula 15-38-10 + 20 g bórax por árbol, causando un incremento de volumen comercial de madera de 31 m³ ha⁻¹ (Kane *et al.* 1992). Los autores recomiendan aplicar una segunda aplicación de fertilizante (kg ha⁻¹) de 150N + 40P + 30K con 20 g por árbol de bórax (aproximadamente 15% B soluble en agua).

En material seleccionado de *E. grandis*, Barros y Novais (1996) encontraron que un clon absorbió del suelo el doble de P que otro clon de la misma especie, produciendo el doble de biomasa de madera; la interacción genotipo x absorción de nutrimentos se basa principalmente en diferencias en el desarrollo del sistema radical, el cual presenta una mayor densidad de raíces en las especies (clones) más eficientes. Para la misma especie, la respuesta en crecimiento de árboles entre 6-12 meses de edad a niveles crecientes de la fórmula 10-30-10 causó incrementos de hasta un 300%, con dosis entre 50-150 g de fertilizante por planta dependiendo del sitio (Cannon 1984). Según Ugalde y Vásquez (1995), *E. grandis* presentó incrementos significativos en diámetro y altura total hasta 9 meses después de la aplicación de 50 y 150 g por árbol de la fórmula 10-30-30 en Turrialba, Costa Rica, lográndose incrementos en volumen del 8 y del 18% al final 6,5 años con el tratamiento de 150 g de fertilizante 10-30-10 en las densidades de 5.000 y 1.250 árboles ha⁻¹.

5.4.2 Respuesta de *Eucalyptus deglupta*

- Varios estudios sobre calidad de sitio para esta especie mencionan que el mejor crecimiento de *E. deglupta* se da sobre suelos profundos (>60 cm), con buen drenaje, texturas medias y fertilidad alta (Jadán 1972; Sánchez 1994; Chavarría 1996). Los modelos de productividad de esta especie indican una correlación positiva con los contenidos de Mg (entre 0,3 y 4,2 cmol(+) L⁻¹) y Ca (entre 0,5 y 14,7 cmol(+) L⁻¹). En general, altos contenidos de materia orgánica (>5%) y de arcilla (>35%) desfavorecen su desarrollo, probablemente porque se asocian con condiciones de mal drenaje (Sánchez 1994).

5.4.3 Respuesta de *Eucalyptus saligna*

Entre las diferentes especies de eucalipto, *E. saligna* es una de las preferidas para la siembra en regiones de clima tropical de laderas, debido a su rápido crecimiento. Sin embargo, la calidad de la madera, que tiende a partirse como otras especies de rápido crecimiento, la hace poco competitiva con *E. deglupta*, la cual se adapta mejor para la confección de postes de electricidad.

Esta especie responde universalmente a la adición de N, en suelos bajos en P a la combinación de N y P, y raramente a la adición de K como fertilizante. Ward et al. (2006) encontraron que la adición de N (0 y 190 kg ha⁻¹ como urea), P (0 y 120 kg ha⁻¹ como superfosfato) y K (0 y 140 kg ha⁻¹ como cloruro de potasio) a plantaciones de 3 a 9 semanas *E. saligna* en terrenos en recuperación después de extracción de bauxita en Australia, causó incrementos en altura (0,58 m sobre el testigo) y diámetro (0,6 cm sobre el testigo) con solo adicionar N, mientras que la adición de NP aumentó la altura en otros 0,34 m y el diámetro en 0,3 cm; la aplicación de K no tuvo ningún efecto sobre las variables de crecimiento.

5.4.4 Respuesta de *Eucalyptus camaldulensis*

En suelos que presentan condiciones óptimas para el cultivo, *E. camaldulensis* se caracteriza por tener un crecimiento muy rápido, el cual presenta los mayores incrementos durante los primeros 7 o 10 años (CATIE 1991). CATIE (1991) reporta en diferentes sitios de América Central, incrementos de hasta 3,8 cm año⁻¹ en diámetro y 4 m año⁻¹ en altura para *E. camaldulensis* y Martínez (1990) reporta incrementos de 3,57 cm año⁻¹ en diámetro y 4,10 m año⁻¹ en altura para *E. saligna*. En Chile Bonomelli y Suárez (1999) encontraron en un estudio de acumulación de biomasa en zonas costeras, del valle central y la

pre-cordillera, que de la siembra a los 12 meses el crecimiento es muy lento, seguido de un crecimiento medio hasta los 24 meses y un crecimiento más acelerado a partir de ese momento; lo cual sugiere que a partir de los doce meses los requerimientos nutricionales serían mayores.

5.5 Podas

Las especies de eucaliptos presentan poda natural, por el cual a medida que el árbol crece en altura las ramas inferiores se van secando y, mediante un sistema de aislamiento natural del nudo con gomo-resina y una fractura, la rama se desprende sola. Este mecanismo no siempre es completamente eficiente y pueden quedar muñones y algunas ramas quedan prendidas y, otras, como en las orillas de la plantación en que las ramas se conservan verdes. Por este motivo es que se debe recurrir a la poda para asegurarse el desrame total.

En plantaciones para producción de madera y astillas, en el cono sur de América del Sur, se suele efectuar la primer poda cuando los árboles alcanzan los 8 cm de dap (2 a 3 años de edad en *E. grandis*). Las siguientes podas se realizan cuando las partes superiores del árbol (sin podar) alcanzan ese diámetro fijado. Es importante tener en cuenta que en la primera poda, la altura podada del fuste no debería superar el 40 % de la altura del mismo, para no afectar su crecimiento. En general se prefiere podar en primavera temprano para favorecer la rápida cicatrización de las heridas.

Como regla práctica, en *E. grandis* se aconseja podar los 2,5 m basales cuando el árbol tiene 6 m, y elevar la poda a 7 m, cuando el árbol alcanza los 12 m. De esta manera se obtienen dos trozas para aserrado.

5.6 Raleos

Las plantaciones de eucaliptos para producción de astillas para la industria del papel, leña e incluso madera raramente se ralean. Cuando se pretende obtener madera de mayor valor se puede utilizar un régimen de raleo, que dependiendo de la densidad inicial, generalmente va de una primera intervención a los 5-6 años y una intensidad que puede variar entre 25% y 40%; un segundo raleo a los 9-10 años con intensidad similar, para llegar a una población de cosecha entre 250 y 350 árboles ha⁻¹, dependiendo de las características del sitio (adaptado de FAO 1981).

5.7 Crecimiento

Los eucaliptos junto con los pinos son las especies más ampliamente plantadas en el mundo tropical. Las especies de los dos géneros presentan incrementos medios anuales relativamente altos y rotaciones cortas, especialmente en el caso de los eucaliptos (cuadro 13). En el caso de los eucaliptos, los mayores incrementos medios anuales se presentan en los primeros 10-15 años de edad de las plantaciones (figura 3), tal como muestra un experimento monitoreado durante 43 años en la estación experimental de Tchianga, en la región Huambo (12° 43'S, 15° 48'E), en Angola, en un sitio localizado a 1650 m sobre el nivel del mar, con 1400 mm de precipitación, sobre un Oxisol plano (Delgado-Matas y Pukkala 2011). A pesar de la altitud en la que fueron plantadas, las especies de *E. saligna* y *E. grandis* sobresalieron por su crecimiento, alcanzando volúmenes de 1427 m³ ha⁻¹ en 652 árboles (IMA en volumen de 33 m³ha⁻¹año⁻¹) y 1006 m³ ha⁻¹ en 476 árboles (IMA volumen de 23,4 m³ ha⁻¹ año⁻¹).

Cuadro 13. Incremento anual y rotación para generos plantados en diferentes países tropicales

Especie	Región	País	Rotación (años)	IMA ($m^3 ha^{-1} año^{-1}$)	
Eucaliptos	América del Sur	Brasil	8 - 10	18 - 20	
		África	Burundi	8	1 - 2
			Congo	7	30
			Rwanda	8	8,5
			Suráfrica	8 - 10	18 - 20
Pinos	América del Sur	Brasil	16 - 25	15 - 25	
		Venezuela	10 - 20	10	
		Chile	20 - 30	24	
	África	Malawi	20 - 25	17	
		Madagascar	15 - 18	6 - 10	
		Mozambique	18 - 25	11	
Teca	Asia	Bangladesh	60	2,6 - 3	
		India	70	2,5	
		Indonesia	50 - 70	1,3 - 2	

Fuente: Brown et al 1997; FAO 2001

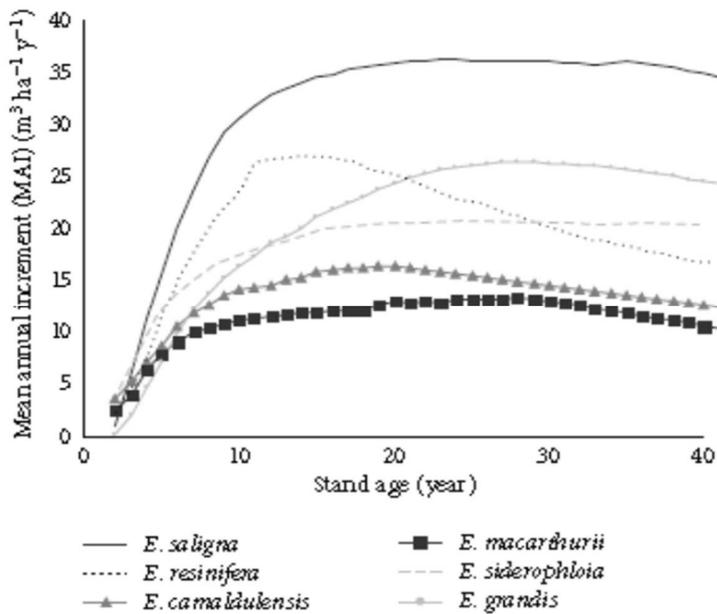


Figura 3. Incremento medio anual del volumen para seis especies de eucaliptos, en plantaciones de 43 años en Angola (fuente: tomado de Delgado-Matas y Pukkala 2011)

5.7.1 *Eucalyptus camaldulensis*

De acuerdo con Lamprecht (1990) *E. camaldulensis* es el más ampliamente distribuido en Australia; se le ha plantado en zonas secas de diferentes países, alcanzando incrementos de 5-10 m³ ha⁻¹ año⁻¹ en rotaciones de 10-20 años, mientras que en regiones húmedas puede alcanzar 30 m³ ha⁻¹ yr⁻¹ (Evans 1992). El cuadro 14 presenta los incrementos obtenidos en plantaciones de camaldulensis en diferentes países:

Cuadro 14. Incremento medio anual en diferentes países

País	IMA (m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)
Argentina	20 – 25
Israel	30
Turquía	17 - 20
Turquí (rebrotos)	25 – 30
Marruecos	3 – 11
Portugal	2 – 10
Italia	6 - 7
Fuente: Lamprecht 1990	
Nicaragua	11 - 16,7
Otarola y Ugalde 1998	
Honduras	20
Nicaragua	12 - 18
CATIE 1986	

5.7.2 *Eucalyptus deglupta*

E. deglupta se considera una especie con gran potencial en los trópicos con tasas de crecimiento que varía desde 25-40 m³ha⁻¹año⁻¹ en sitios considerados buenos, en plantaciones de 15 años en Papua Nueva Guinea para producción de pulpa (Eldridge *et al.* 1993). Rendimientos de 20-40 m³ha⁻¹año⁻¹ son comunes en muchos países en rotaciones cortas de 10 – 12 años o menos; Filipinas, Indonesia, Brasil y Uruguay son los países con las plantaciones más extensas (Eldridge *et al.* 1993).

De acuerdo con CATIE 1991 y FAO 2001, la especie es extremadamente sensible a las condiciones del sitio, susceptible al fuego y a diferentes plagas y enfermedades (Eldridge *et al.* 1993); cuando se planta en sitios pobres, *deglupta* crece tan lentamente que no produce madera y tiende a desaparecer.

El crecimiento en diámetro depende del espaciamiento de plantación, encontrando incrementos de 2-3 cm año en plantaciones para pulpa Alcanzado incrementos en volumen entre 15 y 37 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (Francis 1989). En Costa Rica se han encontrado incrementos medios entre 2 – 39 m³ha⁻¹año⁻¹ en edades de 2-4 años (Sánchez 1994) hasta 89 m³ha⁻¹año⁻¹ en plantaciones de 4,5 años (Ugalde 1980). En Filipinas, plantaciones con una densidad inicial de 625-680 árboles ha⁻¹ han mostrado incrementos medios anuales de 25-30 m³ ha⁻¹ yr⁻¹ (sobre corteza y hasta 10 cm de diámetro menor) en rotaciones de 10 años (FAO 2001).

La edad de rotación en Sabah es de 16-18 años y en Papua Nueva Guinea de 25 años con raleos a los 5, 10 y 15 años.

5.7.3 *Eucalyptus grandis*

E. grandis es probablemente la especie más ampliamente plantada para producción de madera a nivel mundial, con grandes extensiones en Brasil, Africa del Sur, Argentina, Australia, India, Uruguay, Zambia y otros países. En Africa, *E. grandis* se han reportado rendimientos de 25 m³ ha⁻¹ yr⁻¹ en condiciones favorables, aunque en países como Uganda (cuadro 14) se han reportado hasta 37 m³ha⁻¹año⁻¹ promedio en plantaciones de 30 años. En Brasil se han informado de incrementos medios anuales de 25 m³ha⁻¹año⁻¹ en sitios de bajo rendimiento; 33 m³ha⁻¹año⁻¹ en sitios promedio y 50 m³ha⁻¹año⁻¹ en sitios de alto rendimiento (cuadro 15).

Edad	Hdom	Estado del rodal antes de raleo					IMA		ICA
		Arb ha ⁻¹	dap prom	AB ha ⁻¹	Vol _{5cc}	Vol _{10sc}	Vol _{5cc}	Vol _{10sc}	Vol _{5cc}
1	8,0	1870	5,4	4,2	13		13,5		13,5
2	14,3	1870	9,6	13,5	70	5	34,8	2,5	56,1
3	18,8	1870	12,1	21,5	139	82	46,3	27,4	69,4
4	22,2	1870	13,8	28,1	210	154	52,5	38,5	71,0
5	25,0	1685	15,5	32,0	265	216	53,0	43,3	54,9
6	27,4	1461	17,2	34,0	305	265	50,8	44,2	40,0
7	29,3	1304	18,6	35,6	340	307	48,6	43,9	35,4
8	31,1	1189	19,9	36,9	372	343	46,5	42,9	31,7
9	32,6	1101	21,0	38,1	401	376	44,6	41,7	28,7
10	34,0	1030	22,0	39,1	427	404	42,7	40,4	26,1
12	36,4	924	23,7	40,7	473	455	39,4	37,9	23,1
14	38,4	848	25,1	42,1	513	497	36,6	35,5	19,8
16	40,1	791	26,4	43,2	547	534	34,2	33,4	17,4
18	41,6	746	27,4	44,1	578	566	32,1	31,5	15,4
20	42,9	709	28,4	44,9	606	595	30,3	29,8	13,8
22	44,1	679	29,3	45,6	631	621	28,7	28,2	12,5
24	45,2	653	30,0	46,3	654	645	27,3	26,9	11,4
26	46,1	631	30,7	46,8	675	667	26,0	25,6	10,5
28	47,0	612	31,4	47,4	694	687	24,8	24,5	9,7
30	47,8	595	32,0	47,8	712	705	23,7	23,5	9,0

Fuente: tomado de Alder et al. 2003

Sitio	Localización		Altitud msnm	Orden de suelos	Textura		Arcilla (%) a 0,5 m	Densidad (Mg m ⁻³)	Carbon (kg m ⁻²)	Agua disp (mm 2m ⁻¹)
	Lat S	Long W			Arena	Arcilla				
1	11° 55'	38° 32'	230	Quartzipsament	94	6	4	1,58	1,8	61
2	11° 57'	38° 29'	270	Quartzipsament	95	3	5	1,60	2,3	64
3	11° 47'	38° 33'	210	Oxisol	89	10	15	1,54	4,4	88
4	11° 51'	38° 28'	250	Oxisol	80	12	16	1,47	3,2	113
5	11° 49'	38° 22'	220	Ultisol	85	12	16	1,47	3,7	101
6	11° 58'	38° 33'	300	Ultisol	92	6	6	1,59	2,2	66
7	11° 47'	37° 54'	150	Ultisol	63	35	41	1,57	6,4	145
8	12° 02'	38° 28'	310	Ultisol	88	10	20	1,58	3,9	93
9	12° 05'	38° 15'	180	Quartzipsament	98	2	2	1,58	2,5	60
10	11° 58'	38° 07'	180	Ultisol	82	15	23	1,45	5,4	108
11	12° 00'	38° 14'	200	Ultisol	92	6	10	1,58	2,7	78
12	12° 16'	38° 51'	50	Quartzipsament	96	4	3	1,60	3,5	60
13	12° 18'	38° 01'	80	Ultisol	89	8	12	1,54	6,6	87
14	12° 02'	38° 57'	100	Ultisol	84	11	18	1,40	5,2	108

Cuadro 15 b. Características biométricas de los rodales. Diferentes letras muestran valores diferentes estadísticamente a P=0.05

Sitio	Edad	medio (cm)	Índice Sitio (m 5 años)	Índice Área Foliar (m ² m ⁻²)	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Biomasa (Mgha ⁻¹)	IMA (Mgha ⁻¹ ha ⁻¹)	Productividad primaria neta (Mgha ⁻¹ ha ⁻¹)	Precipitación media mm año ⁻¹
2	7,2	12,2	17,6	2,9	14,3	81	11,1	9,7	916
3	6,1	12,1	17,4	2,9	13,7	66,9	9,4	9,7	853
4	7,1	12,8	19,9	3,4	16,9	94,6	12,5	10,6	935
5	7,3	12,8	19,0	3,1	15,1	78,7	10,9	14,9	902
6	6	13,2	20,0	3,8	15,8	90,6	15,1	14,2	955
7	5,1	13,7	23,2	3,0	18,5	97,7	18,9	14,8	1143
8	5	12,8	20,6	3,0	15,3	82,2	15,6	15,0	958
9	6,3	13,1	22,3	2,2	16,7	101,3	15,1	19,8	1008
10	6,1	15,0	23,5	3,3	19,6	114,1	16,6	22,3	1131
11	6,2	13,8	24,2	3,7	19,0	124,0	18,8	23,0	1054
12	7,9	14,9	21,8	4,2	25,2	147,5	19,9	25,1	1605
13	6,3	16,2	29,2	4,6	28,6	201,9	31,9	28,2	1811
14	6,3	17,1	25,8	5,8	30,1	204,0	32,6	39,1	1654
Bajo	6,5	12,5b	18,9c	2,9b	14,8b	80,0b	12,0b	10,9b	897c
Medio	5,7	13,2b	21,5b	3,0b	16,6b	92,0b	15,9b	16,0b	1016b
Alto	6,5	15,4a	24,9a	4,3a	24,5a	158,3a	24,0a	27,5a	1411a

Fuente: Stape et al. 2004

5.7.4 Respuesta del eucalipto a la acidez del suelo

No todas las especies de eucalipto tienen la misma tolerancia a la acidez del suelo. En un ensayo de solución nutritiva con niveles crecientes de Al adicionado como AlCl₃.6H₂O llevado a cabo por Neves *et al.* (1982) se encontró que la tolerancia es *E. urophylla* > *E. paniculata* > *E. grandis* > *E. cloeziana* cuando dicha tolerancia se estima como altura de planta y producción de materia seca.

5.7.5 Respuesta al encalado

Cuando el eucalipto se planta en suelo ácido y debido a que consume grandes cantidades de Ca, es de esperar que haya respuesta al encalado. Novais *et al.* (1979), estudiaron el efecto de la aplicación de fertilizante (0, 100, 200, 300 y 400 g N por tonelada de sustrato en la forma de urea; 0, 200, 400, 600 y

800 g P₂O₅ por tonelada de sustrato como fosfato mono cálcico y 0, 100, 200, 300 y 400 g K₂O por tonelada sustrato como KCl) con y sin cal, sobre el crecimiento de plántulas de *E. grandis*. Se encontró que en ausencia de cal y fertilizante, las plántulas alcanzaron una altura de 1,3 cm, mientras que en los tratamientos de NPK más balanceados y con encalado, alcanzaron entre 30 y 35 cm de altura a los 70 días. Este efecto también fue muy notorio en el crecimiento de las raíces, sobre todo en los tratamientos en que se aplicó P.

Las respuestas del eucalipto al encalado, cuando ocurren, afectan más el crecimiento en diámetro que en altura. Barros y Novais (1990), citan que Mello (1968) detectó una ligera superioridad en el diámetro de las plantas de *E. saligna* de 24 meses de edad la adición de 2 t de cal en comparación con aquellas que no fueron encaladas. Resultados similares fueron obtenidos por Valeri *et al.* (1983) en un suelo con 0,20 cmol Ca⁺² + Mg⁺² 100 g⁻¹ de suelo, donde la aplicación de la misma cantidad de cal resultó en un mayor aumento del diámetro de *E. grandis* a la edad de 18 meses. Es interesante recalcar que, según los resultados obtenidos por Vale *et al.* (1984), citado por Barros y Novais (1990), en un suelo con contenidos adecuados de Ca y Mg para el crecimiento del eucalipto, el encalado puede tener más efectos negativos que positivos.

5.7.6 Efectos sobre las propiedades del suelo

Ladrach (2005), concluye que los eucaliptos no solo no causan infertilidad de los suelos, sino que tampoco tienen un efecto negativo sobre el régimen de humedad del suelo; el autor resume los trabajos de Lima (1984, 1993) y de Lima y Freire (1976) en Brasil, concluyendo que:

- La información disponible no permite concluir que el eucalipto pueda alterar el régimen de lluvias.
- Las pérdidas de agua de lluvia por intercepción son menores para los eucaliptos que los valores medios encontrados con otras especies en plantación o en bosques naturales.
- Las plantaciones de eucalipto pueden contribuir positivamente para el control de la erosión superficial y por lo tanto para la conservación del suelo y sus nutrimentos.
- El agua que drena de las cuencas hidrográficas que contienen bosques naturales de eucaliptos es por lo general de alta calidad. El agua del suelo y del subsuelo que se encuentra bajo las plantaciones de eucalipto, de bosques naturales u otros tipos de vegetación no es marcadamente diferente.
- Aunque aún no se dispone de suficiente información, los datos disponibles indican que la deficiencia de producción de biomasa por unidad de agua consumida es relativamente alta para los eucaliptos en comparación con otras especies forestales.
- El balance hídrico de las cuencas hidrográficas reforestadas con eucaliptos no es diferente al que se observa en cuencas con otros tipos de cobertura forestal.
- A largo plazo, las plantaciones de eucaliptos en pie están mostrando efectos positivos sobre las propiedades químicas del suelo.
- La demanda o exigencia de nutrimentos que tienen las plantaciones de eucalipto de crecimiento rápido es relativamente alta en comparación con las especies de crecimiento lento, pero es del mismo orden de la demanda que tienen otras especies forestales de crecimiento rápido y es mucho menor que la demanda normal de nutrimentos que requieren los cultivos agrícolas.

- La evidencia disponible no apoya el argumento de que los eucaliptos son especies invasoras que acaban con la flora nativa, ni que tienen efectos alelopáticos que suprimen el crecimiento de otras especies de la flora. Con tiempo, las especies locales pueden desarrollarse en un sotobosque rico debajo de los eucaliptos y lo es más, una vez recuperados los suelos, las especies forestales originarias eventualmente pueden regresar y volver a crecer en esos sitios.

Frente a los recelos o prevenciones que se tiene contra los eucaliptos en algunas regiones, varias especies en diferentes países han contribuido a mejorar la economía tanto nacional como de los propietarios, incluyendo pequeños propietarios, como es el caso del *E. camaldulensis*, utilizado intensivamente para producción de leña en Nicaragua, postes y madera en Guatemala; o como *E. grandis* en Brasil, Uruguay, Paraguay. Argentina y Colombia, para la producción de astillas, tableros contrachapados y de partículas y madera o *E. globulos* en Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia y Chile.

5.8 Plagas y enfermedades

Las especies de eucaliptos pueden ser atacadas en vivero por la denominada “podredumbre de los semilleros” (“damping off” o mal de talluelo), enfermedad compleja que produce notables pérdidas en los almácigos antes y después de la germinación. Es causada por gran variedad de hongos, entre los que se puede mencionar *Pythium* spp., *Phytophthora* spp., *Fusarium* spp. y *Thanatephorus cucumeris* (*Rhizoctonia solani*). Las condiciones que favorecen el ataque varían con el patógeno, pero el peligro de pérdidas puede reducirse evitando densidades elevadas de siembra, semilleros con alto contenido orgánico, reacción alcalina y excesos de riego y sombra.

Cylindrocladium scoparium Morgan es otra enfermedad que ha provocado notables pérdidas en viveros y material de trasplante en Argentina, Brasil, Uruguay y otros; en Costa Rica Arguedas (2007) menciona una especie del género (*C. scoparium*) como causante de pérdidas en viveros en varios sitios del país. el cuadro 16

Se han registrado gran cantidad de patógenos del fuste de *Eucalyptus* spp. de los cuales dos, por lo menos, han provocado pérdidas importantes: *Diaporthe cubensis* Bruner y *Corticium salmonicolor* Berk. y Br., este último reportado en Costa Rica.

Como con toda enfermedad, las medidas de prevención son la forma más efectiva de control; al presentarse cualquier síntoma debe comunicarse y recibir asistencia técnica de personal especializado.

Un insecto muy común en plantaciones del género es la hormiga defoliadora (*Atta* sp. y *Acromirmex* sp.) la que debe controlarse oportunamente, ya que puede causar daños de importancia económica; esto es especialmente importante en las primeras etapas de crecimiento.

Cuadro 16. Plagas y enfermedades que atacan al género Eucalyptus en Costa Rica					
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>					
<i>Insectos</i>					
Atta sp.	Formicidae	HYM	Follaje	Turrialba	C
Trigona sp.	Apidae	HYM	Fuste	Turrialba	C
<i>Patógenos</i>					
Diplodia sp.			Follaje	Turrialba	C
<i>Eucalyptus deglupta</i>					
<i>Insectos</i>					
Acanalonia sp.	Acanoloiidae	HOM	Ramillas	Turrialba	C
Aconophora ferruginea	Membracidae	HOM	Ramillas		
Aphis s.	Aphididae	HOM	Ramillas		
Atta sp.	Formicidae	HYM	Follaje	Siquirres	L
Bolbonota sp.	Membracidae	HOM	Ramillas	Turrialba	C
Ceresa concinna	Membracidae	HOM	Ramillas	Turrialba	C
Clastoptera sp.	Cercopidae	HOM	Ramillas	Turrialba	C
Coptotermes crassus	Rhinotermitidae	ISO	Fuste	Pérez Zeledón	SJ
				Turrialba	C
				Siquirres	L
Enchenopa lanceolata	Membracidae	HOM	Ramillas	Turrialba	C
Exophthalmus jekelianus	Curculionidae	COL	Follaje	Turrialba	C
Graphocephala coccinea	Cicadellidae	HOM	Ramillas	Turrialba	C
Graphocephala rufimargo	Cicadellidae	HOM	Ramillas	Turrialba	C
Hasenia pulverulenta	Flatidae	HOM	Ramillas	Turrialba	C
Macunolla ventralis	Cicadellidae	HOM	Ramillas	Turrialba	C
Membracis albolimbata	Membracidae	HOM	Ramillas	Turrialba	C
Micrutalis lugubrina	Membracidae	HOM	Ramillas	Turrialba	C
Nodonota irazuensis	Chrysomelidae	COL	Follaje	Turrialba	C
				Alvarado	C
Oncometopia sp.	Cicadellidae	HOM	Ramillas	Turrialba	C
Saisettia sp.	Coccidae	HOM	Ramillas	Turrialba	C
Selenothris rubrocinctus	Thripidae	THYS	Follaje	Siquirres	L
Sibovia occatoria	Cicadellidae	HOM	Ramillas	Turrialba	C
Sphenorhina conspicua	Cercopidae	HOM	Ramillas	Turrialba	C
Trigona corvina	Apidae	HYM	Brotos	Pérez Zeledón	SJ
<i>Patógenos</i>					
Agrobacterium tumefaciens			Fuste	Santa Ana	SJ
				Cartago	C
Botrytis sp.			Follaje	San Carlos	A
				Turrialba	C
Colletotrichum sp.			Follaje	Paraiso	C
				La Unión	C

Cuadro 16. Plagas y enfermedades que atacan al género Eucalyptus en Costa Rica (continuación)					
Corticium salmonicolor			Fuste		
Cryphonectria cubensis			Fuste	Guácimo	L
Cylindrocladium sp.			Brotes	Paraiso	C
				Turrialba	C
			Follaje	San Ramón	A
				San Mateo	A
				San Carlos	A
				San Isidro	H
				Paraiso	C
				Turrialba	C
Diplodia sp.			Ramas	Turrialba	C
Phytophthora sp.			Raíz	Turrialba	C
				Guácimo	[
Pseudoseptoria sp.			Follaje		
<i>Vertebrados</i>					
Orthogeomys heterodus	Geomyidae	ROD	Plántula	La Unión	C
<i>Eucalyptus grandis</i>					
<i>Patógenos</i>					
Colletotrichum sp.			Follaje	Hojancha	C
Cylindrocladium scoparium			Follaje	Turrialba	C
Diplodia sp.			Follaje	Hojancha	G
<i>Eucalyptus saligna</i>					
<i>Insectos</i>					
Acheta assimilis	Gryllidae	SALT	Plántula	San Ramón	A
Agrotis ipsilon	Noctuidae	LEP	Plántula	San Ramón	A
Atta sp.	Formicidae	HYM	Follaje	San Ramón	A
Trigona silvestriana	Apidae	HYM	Fuste	Turrialba	C
<i>Patógenos</i>					
Agrobacterium tumefaciens			Fuste	Dota	SJ
Cryphonectria cubensis			Fuste	Dota	SJ
				San Ramón	A
				Jiménez	C
Cylindrocladium scoparium			Follaje	Turrialba	C
<i>Vertebrados</i>					
Orthogeomys heterodus	Geomyidae	ROD	Plántula	La Unión	C
Sciurus variegatoides	Sciuridae	ROD	Fuste	San Ramón	A

5.9 Cosecha

La extracción de madera de plantaciones depende tanto del objetivo de producción y el tamaño de la operación, como de la topografía y el tamaño de los productos a extraer. La fuerza animal es ampliamente utilizada, como por ejemplo bueyes (utilizados en Costa Rica), mulas (utilizadas en

Colombia), así como tractores y cables aéreos (figura 4). El sistema a utilizar depende, en consecuencia, de las condiciones propias de cada operación.



Extracción mecanizada de Eucalyptus en Colombia, incluyendo el uso de cables aéreos



Uso de animales para la extracción de trozas de eucalipto para producción de pulpa

Figura 4. Diferentes formas de extracción de madera de Eucalyptus sp.

Fuente: colección personal

5.10 Costos

No se dispone de información sobre el establecimiento de plantaciones de *Eucalyptus spp.*; un estudio reciente de costos de establecimiento en Colombia (2012) para las especies más plantadas en este país con apoyo de los Certificados de Inversión Forestal (el equivalente al apoyo PSA de Costa Rica) encontró los costos indicados en el cuadro 19, comparados con los costos indicados por ONF para Costa Rica.

Cuadro 19. Costos de establecimiento

Costos promedio de establecimiento y mantenimientos consolidados (2012)					CR 2012	
Actividad	Eucaliptos	Pinos	Teca	Gmelina		
Establecimiento	1213,97	1172,51	1263,81	1355,01		1271,77
Valor CIF 2012	483,85	483,85	483,85	483,85		459,47
% cubierto por CIF	39,9%	41,3%	38,3%	35,7%		36,1% PSA
Mantenimiento año 1	290,81	279,87	276,38	323,07		330,80
Mantenimiento año 2	362,93	332,06	366,95	344,31		255,89
Mantenimiento año 3	296,35	298,62	270,51	234,43		303,21
Mantenimiento año 4	246,03	184,35	159,27	169,26		135,95
Subtotal mantenimiento	1196,12	1094,91	1073,11	1071,06		1025,85
Valor CIF 2012	389,84	389,84	389,84	389,84		459,47
% cubierto CIF	32,6%	35,6%	36,3%	36,4%		44,8% PSA
Subtotal establecimiento + mantenimiento años 1-4	2410,09	2267,42	2336,93	2426,08		2297,62
Costo mantenimiento año 5 en adelante	488,46	1143,83	1200,15	759,93		493,86
Total costos del ciclo	2898,54	3411,25	3537,08	3186,01		2791,48
Administración + asistencia técnica	189,15	226,09	502,29	185,39		245,65
Costo total	3087,69	3637,34	4039,38	3371,40		3037,13

Fuente: Adaptado de CONIF 2012

Literatura citada

- ADJOUD, D.; HALLI, R. 2000. Occurrence of arbuscular mycorrhiza on aged eucalyptus. *Mycorrhiza* 9(5):287-290.
- AGUIRRE, M.; CARPINETI, L.A.; DALLA TEA, F.; DENEGRI, G.; FRANGI, J.; GARRA, S.; GIMENEZ, E.; GLADE, J.; LAROCCA, L.; MARCO, M.; MENDOZA, L.; PUJATO, J.; REMBADO, G.; SANCHEZ A., M.; VACCARO, N. 1995. Manual para productores de eucaliptos en la Mesopotamia argentina. Concordia, Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 171 p.
- ALDER, D.; DRICHL, P.; ELUNGAT, D. 2003. Yields of Eucalypts and Pinus in Uganda. Consultancy Report for the Uganda Forest Resources Management and Conservation Programme. 52 p.
- ALVARADO, A.; THIELE, H. 2012. Nutrición y fertilización del eucalipto (*Eucalyptus* sp.). In ALVARADO A, RAIGOSA J. (eds). 2012. Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. ACCS, San José, Costa Rica. pp. 261-284
- APARICIO, J.L.; LAROCCA, F.; DALLA TEA, F.; 1998. Silvicultura de establecimiento de *Eucalyptus grandis*. In Concordia, Argentina: XIII Jornadas Forestales de Entre Ríos, I Encuentro Forestal CEDEFOR del Mercosur, Actas.
- ARGUEDAS G., M. Plagas y enfermedades forestales en Costa Rica San José, Costa Rica: Corporación Garro y Moya, 2008. 69 p.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. 1996. Eucalyptus nutrition and fertilizer regimes in Brasil. In: PM Attiwill, MA Adams (eds.) Nutrition of eucalyptus. CSIRO, Collingwood, Australia. pp. 335-355.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; CARDOSO J.R.; MACEDO, P.R.O. 1990. Algumas relações solo-eucalipto em suas condições naturais. In: NF Barros, RF de Novais (eds.). Relação solo-eucalipto. Editora Folha de Viçosa. Viçosa MG, Brasil. pp. 1-24.
- BELLOTE, A.F.J.; DEDECEK, R.A.; SILVA, H.D.; DA GAVA, J.L.; MENEGOL, O. 2001. Nutrient export by clear cutting of *Eucalyptus grandis* of different ages on two sites, in São Paulo, Brasil. In: International Workshop Rehabilitation of Degraded Tropical Forest Ecosystems. pp. 173-177.
- BOLAND, D.J; BROOKER, M.L.H.; CHIPPENDALE, G.M.; HALL, H.; HYLAND, B.P.M.; JOHNSTON, R.D.; KLEINIG, D.A.; TURNER, J.D. 1984 Forest trees of Australia. Melbourne, Australia, CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization). 687 p.
- CANNON, P.G. 1980. 1981. Fertilización de plantaciones con NPK, calfos y bórax: resultados al final de cuatro años. Cartón de Colombia, S.A., Cali. 10 p. Informe de Investigación, N° 68.
- CANNON, P.G. 1983. Ciclo de nutrientes en plantaciones. In: Cartones de Colombia S.A. Fertilización forestal en el Valle y el Cauca. Cali, Colombia. pp. 85-98.
- CANNON, P.G. 1983. La optimización de la fertilización de eucaliptos en algunos suelos Andepts. In: Fertilización Forestal en El Valle y El Cauca. Smurfitt Cartón de Colombia, Octavo informe anual. pp. 133-150.

CANNON, P.G. 1984. La fertilización del eucalipto en algunos suelos andepts. Suelos Ecuatoriales 14(1):19-27.

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 1986. Silvicultura de especies promisorias para la producción de leña. Turrialba, Costa Rica. CATIE, Serie Técnica, Informe Técnico No 86. 220 p.

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 1986. Saligna (*Eucalyptus saligna*) especie de árbol de uso múltiple en América Central. Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 66 p. Serie Técnica. Informe Técnico, N° 184.

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 1991. Deglupta (*Eucalyptus deglupta*) especie de árbol de uso múltiple en América Central. Turrialba, Costa Rica. CATIE, Serie Técnica, Informe Técnico No 240. 45 p.

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 1991. Resultados de 10 años de investigación silvicultural del proyecto Madeleña en Panamá. L. Ugalde (ed.), Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 110 p. Serie Técnica. Informe Técnico, N° 293.

CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 1997. Resultados de 10 años de investigación silvicultural del proyecto Madeleña en Nicaragua. L. Ugalde (ed.), Turrialba, Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 300 p. Serie Técnica. Informe Técnico, N° 291.

COSTA, L.M.; 1990. Manejo de solos en áreas reforestadas. In: NF Barros, RF Novais (eds.). Relação solo eucalipto. Editora Folha de Viçosa. Viçosa, Brasil. Capítulo 6. pp. 237-264.

CROMER, R.N.; CAMERON, D.M.; RANCE, S.J.; RYAN, P.A.; BROWN, M. 1993. Response to nutrients in *Eucalyptus grandis*. 1. Biomass accumulation. Forest Ecology and Management 62:211-230.

CROMER, R.N.; CAMERON, D.M.; RANCE, S.J.; RYAN, P.A.; BROWN, M. 1993. Response to nutrients in *Eucalyptus grandis*. 2. Nitrogen accumulation. Forest Ecology and Management 62:231-243.

DALLA TEA, F.; LAROCCA, F. 1998. Establecimiento de plantaciones forestales en la costa del río Uruguay. In Concordia, Argentina: XIII Jornadas Forestales de Entre Ríos, I Encuentro Forestal CEDEFOR del Mercosur, Actas.

DEDECEK, R.A.; BELLOTE, A.F.J.; GAVA, J.L.; MENEGOL, O. 2001. Site characterisation and the effects of harvesting on soil tillage on the productivity of *Eucalyptus grandis* plantations in Brasil. In: S Kobayashi, JW Turnbull, T Toma, T Mori. N.M.N.A. Majid (eds.). Rehabilitation of degraded tropical forest ecosystems: workshop proceedings. 2-4 November 1999. Bogor, Indonesia. CIFOR. pp. 157-164.

DELGADO-MATAS, C.; PUKKALA, T. 2011. Comparison of the growth of six *Eucalyptus* species in Angola. International Journal of Forestry Research, Volume 2011, 9 p.

ELDRIDGE, K.; DAVIDSON, J.; HARDWOOD, C.; van WYG, G. 1993. Eucalypt Domestication and Breeding. Oxford Science Publications. USA. 288 p.

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1981. El Eucalipto en la repoblación forestal. Roma, Italia, FAO, Colección FAO Montes N° 11. 723 p.
- FAO (Food and Agricultural Organization of the United Nations). 2001. Mean annual volume increment of selected industrial forest plantation species by L Ugalde & O Pérez. Forest Plantation Thematic Papers, Working Paper 1. Forest Resources Development Service, Forest Resources Division. FAO, Rome (*unpublished*).
- FRANCIS, J.K. 1989. The Luquillo Experimental Forest Arboretum. Res. Note SO-358. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 8 p.
- GONÇALVES, J.L.; DEMATTE, J.L.; DO COUTO, H.T. 1990. Relações entre a produtividade de sítios florestais de *Eucalyptus grandis*. y *Eucalyptus saligna* com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e media no estado de São Paulo. IPEF (43/44):24-39.
- GONÇALVES, J.L.; POGGIATI, F.; STAPE, J.L.; SERRANO, M.I.; MELLO, S.L.; MENDES, K.C.F.; GAVA, J.L.; BENEDETTI, V. 1998. Eucalypt plantations in the humid tropics: São Paulo, Brazil. In: EKS Nambiar, C Cossalter, A Tiaras (eds.) Site management and productivity in tropical plantation forests. Workshop Proceedings 16-20 February. Pietermaritzburg, South Africa. pp. 5-12.
- HILLIS, W.E.; BROWN, A.G. 1984. Eucalyptus for Wood production. Melbourne, Australia, CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization). 434 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA. 1995. Manual para productores de eucaliptos de la Mesopotamia argentina. INTA. 171 p.
- HAAG, H.P. (ed.). 1983. Nutrição mineral de *Eucalyptus*, *Pinus*, *Araucaria* e *Gmelina* no Brasil. Fundação Cargill. Campinas, Brasil. 202 p.
- JADAN, S. 1972. Sistemas de clasificación de índices de sitios para *Eucalyptus deglupta* B.L. en Turrialba, Costa Rica. Tesis de Maestría. Centro Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica. 99 p.
- JUDD, T.S.; BENNETT, L.T.; WESTON, C.J.; ATTIWILL, P.M.; WHITEMAN, P.H. 1996. The response of growth and foliar nutrients to fertilizers in young *Eucalyptus globulus* (Labill.) plantations in Gippsland, southeastern Australia. Forest Ecology and Management 82:87-101.
- KANE, M.B.; WRIGHT, J.A.; LAMBETH, C.C. 1992. La fertilización aumenta el crecimiento de *Eucalyptus grandis* en la Meseta de Popayán: resultados a tres años. Cartón de Colombia. Cali 24 p. Informe de Investigación, N°144.
- MACKENSEN, J. 1999. Nutrient management for industrial tree plantations (HTI) in Indonesia, a tropical guidance towards integrated nutrient management. GTZ Tropical Forest Research. Eschborn, Alemania. 96 p.
- MACKENSEN, J.; FÖLSTER, H. 1999. Study on sustainable nutrient supply in fast growing plantations. GTZ Tropical Forest Research. Eschborn, Alemania. 60 p.
- MARTINEZ H, H.A.; 1987. Silvicultura de algunas especies de árboles de uso múltiple II. El Chasqui. 13:16-23.

- MARTINEZ H, H.A.; 1990. Camaldulensis (*Eucalyptus camaldulensis*) especie de árbol de uso múltiple en América Central. Turrialba, Costa Rica. CATIE, Serie Técnica, Informe Técnico No 158. 58 p.
- MORALES, J.; ORTEGA, H. 1980. Fertilización en eucalipto en las sabanas orientales de Venezuela. *Venezuela Forestal* 4:23-30.
- PAUL, E.A.; CLARK, F.E. 1996. *Soil microbiology and biochemistry*. 2nd ed. Academic Press, San Diego, California. 340 p.
- SALAZAR, R.; JIMENEZ, V. 1988. Comportamiento de *Eucalyptus deglupta* en Costa Rica. *Silvoenergía (Costa Rica)* No 24:1-4
- SANCHEZ, A. 1994. Crecimiento de *Eucalyptus deglupta* y *Eucalyptus grandis* bajo tres sistemas de plantación a nivel de finca, en la zona de Turrialba, Costa Rica. Tesis de Maestría. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica. 112 p.
- SILVEIRA, R.L.V.; MALAVOLTA, E. 2000. Nutrición y fertilización potásica en Eucalipto. *Informaciones Agronómicas, POTAFOS, Encarte técnico* 91:1-10.
- SILVEIRA, R.L.V.; HIGASHI, E.; SGARBI, F.; MUÑIZ, M.R. 2001. Seia o doutor do seu eucalipto. *Informaciones Agronómicas, POTAFOS, Encarte Técnico* 93:1-32.
- SPAGENBERG, A.; FÖLSTER, H. 2002. Eucalyptus plantations in Brasil: their soil-nutrient dynamics and management. *In: MV Reddy (ed.). Management of tropical plantation-forests and their soil-litter Systems*. Science Publishers. New Hampshire, USA. Chapter 12. pp. 306-325.
- STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G. 2004. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. *Forest ecology and management*. Vol. 193, no. 1/2 (May 2004): p. 17-31.
- TRAPPE, J.M. 1977. Selection of fungi for ectomycorrhizal inoculation in nurseries. *Annual Review of Phytopathology* 15:203-222.
- UGALDE, L.1980. Rendimiento y aprovechamiento de dos intensidades de raleos selectivos en *Eucalyptus deglupta* Blume, en Turrialba, Costa Rica. Tesis Magister Scientiae. CATIE. C. R. 127 p.
- VELEZ, E. 1981. Optimización de fertilizantes en *Pinus patula* y *Eucalyptus grandis* y el efecto de la densidad aparente del suelo en *Eucalyptus grandis* en el vivero "La Florida" de Popayán. *Cartón de Colombia, S.A., Cali*. 16 p. Informe de Investigación, N° 71.
- WARD, S.C.; PICKERSGILL, G.E.; MICHAELSEN, D.V.; BELL, D.T. 1985. Responses to factorial combination of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers by saplings of *Eucalyptus saligna* Sm., and the prediction of the responses by DRIS indices. *Australian Forestry Research* 15:27-32.
- XIANGHEN, L.; MALAJCZUK, N.; DELL, B. 1998. Mycorrhiza formation and growth of *Eucalyptus globulus* seedlings inoculated with spores of various ectomycorrhizal fungi. *Mycorrhiza* 8 (2):81-86.

Anexo 1. Metodología para elaboración del mapa de Áreas Potenciales para Especies Seleccionadas dentro de la consultoría “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”

1. Antecedentes

El Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO), es el responsable legal del financiamiento del sector forestal costarricense. Esta labor la realiza a través de dos modalidades a saber: pago por servicios ambientales y el crédito dirigido a pequeños y medianos productores. De acuerdo con los Términos de Referencia (TdR)³ el FONAFIFO es el punto focal del REDD + y responsable de la ejecución de tareas del Readiness Plan (RP); se ha definido como una de las acciones estratégicas para REDD+, el aumento de la producción y consumo sostenible de madera, como una forma, entre varias, de aumentar la cobertura forestal, reducir el peligro de deforestación en el mediano plazo y aumentar la fijación y almacenamiento de carbono.

Por su lado, la Oficina Nacional Forestal (ONF), ente público no estatal creado por la Ley Forestal N° 7575 para promover el desarrollo forestal del país, está constituida por 40 organizaciones de pequeños y medianos productores, industriales y comerciantes de la madera, grupos ecologistas, artesanos y productores de muebles.

Las dos instituciones han aunado sus esfuerzos para la ejecución de las tareas del RP y dentro de éste, la consultoría orientada a identificar los aspectos relevantes para estimular la reforestación comercial, ya sea mediante el empleo de prácticas tradicionales o el uso de sistemas agroforestales (SAF), incluyendo los sistemas silvopastoriles (SSP) para aumentar la producción de madera y por tanto la captura de carbono, necesario para la formación y acumulación de madera. Como resultado de la consultoría indicada, la estrategia REDD+ financiaría la ejecución de un proyecto coordinado por FONAFIFO y dirigido por la Oficina Nacional Forestal, (ONF) para el **“Fomento de la Reforestación comercial para la mejora y conservación de las Reservas de carbono”**, como parte de la estrategia para aumentar los acervos de carbono, una acción estratégica de REDD+.

Objetivos

De acuerdo con los TdR, la consultoría tiene como objetivo general “Mejorar las condiciones para el fomento de la reforestación comercial, los sistemas agroforestales y silvopastoriles para aumentar los acervos de carbono”, lo cual implica conocer las motivaciones de los productores actuales y potenciales para el establecimiento y manejo de plantaciones, utilizando diferentes métodos de plantación, incluyendo los sistemas agroforestales y silvopastoriles.

Los objetivos específicos son:

- Estimar las existencias de plantaciones forestales, identificando las barreras que desalientan la actividad.
- Desarrollar paquetes tecnológicos para el establecimiento de plantaciones forestales, mejorando las capacidades de los involucrados en dichas actividades.

³ FONAFIFO/FCPF/Donación TF012692. 2014. Términos de referencia para la contratación de la consultoría “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”, San José, Costa Rica, FONAFIFO. 7 p.

- Promover el establecimiento de las plantaciones forestales con fines de producción de madera para usos de larga duración.

Dentro del objetivo dirigido al desarrollo de paquetes tecnológicos, una de las tareas de la consultoría es la elaboración de un mapa de áreas potenciales para el cultivo de madera, para lo que se han planteado las siguientes tareas:

- a. Recopilar información cartográfica: suelos y fertilidad, lluvias y duración de sequía, uso actual y potencial, infraestructura, desarrollo social y desarrollo humano, PEA y disponibilidad de PEA;
- b. Elaborar diferentes capas con información cartográfica a escala 1:200.000 para obtener zonificación para las especies seleccionadas;
- c. Elaborar los mapas escala 1:200.000 con la zonificación para especies priorizadas

Una tarea previa a la elaboración del mapa fue el análisis de las especies utilizadas para proyectos de reforestación en Costa Rica. Se elaboró el documento “Preselección de especies en la consultoría “Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono”, que hizo el análisis de las principales especies utilizadas en el país para los diferentes proyectos de reforestación, desde los de carácter industrial (de tamaño grande y especies con mercado relativamente establecido) hasta pequeños proyectos familiares; el análisis incluyó los proyectos financiados tanto por la iniciativa privada, como aquellos que han contado con el pago por servicios ambientales por parte del FONAFIFO, o con financiamiento mixto.

Paralelo a la preselección de las especies se inició un estudio para evaluar la disponibilidad de madera en las plantaciones forestales establecidas hasta la fecha, mediante un muestreo de campo.

Un segundo análisis previo a la elaboración del mapa fue la determinación de las barreras para el establecimiento de plantaciones y reforestación a nivel nacional, dando como resultado el documento “Barreras que desalientan el cultivo de madera”.

Un tercer nivel de análisis fue una revisión exhaustiva de la literatura relevante sobre las especies seleccionadas por el Comité Evaluador del Proyecto, tanto en el ámbito nacional como a nivel externo.

Con la información aportada por estas etapas previas, se seleccionaron los principales indicadores para las especies, que permitieran priorizar áreas para el establecimiento de plantaciones (comerciales, sistemas agroforestales y silvopastoriles). Los indicadores seleccionados fueron: precipitación, distribución de las lluvias y duración de la época seca, temperaturas medias (incluyendo los extremos máximos y mínimos), suelos (órdenes y subórdenes), uso actual (distribución de cobertura vegetal), excluyendo las áreas con bosques, áreas protegidas y otras áreas con bosque; no fue posible obtener información cartográfica de la tenencia (catastro); con la información se espera disponer de un mapa preliminar del área potencia para cada una de las especies seleccionadas (5 mapas a escala 1:200.000), los cuales, complementados con la información en paquetes tecnológicos diseñados para cada una de las especies, permitirían tomar decisiones respecto a la factibilidad de una especie en un sitio determinado. El trabajo de análisis cartográfico fue realizado con el apoyo del Ingeniero Freddy Argotty, consultor privado.

Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos en la consultoría, fue necesario diseñar un modelo de pesos ponderados el cual permite desarrollar un análisis multicriterio entre varios rasters. Análisis de este tipo generan resultados más robustos puesto que permiten darle mayor importancia a variables de significativa importancia que definen el establecimiento de las especies.

Se trabajó con ocho variables (altitud, pendiente, capacidad de uso, temperatura, precipitación, pH, suborden de suelos y meses secos). Todas las capas vectoriales se convirtieron en rasters manteniendo un marco de trabajo similar en todas las capas⁴. La resolución espacial fue seleccionada de acuerdo al raster con resolución más fina (altitud: 30 m).

1. Capa de información: Altitud

Formato: Grid

Fuente: ASTER GDEM V2 (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer-Global Digital Elevation Model).

Descripción: La información fue obtenida a partir del modelo de elevación digital (DEM), de 30 metros de resolución espacial actualizado a 2011. Los datos fuente fueron recortados a nivel de país y se proyectó a coordenadas CRTM05. Datos de elevación faltantes fueron calculados a partir de interpolación espacial zonal.

2. Capa de información: Pendiente

Formato: Grid

Fuente: ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer-Global Digital Elevation Model)

Descripción: A partir del DEM y bajo la herramienta “*slope*” del analista espacial de ArcGis fue generada esta capa para Costa Rica. Se determinó como unidad de medida de salida el porcentaje de pendiente.

3. Capa de información: Capacidad de Uso del Suelo 2004

Formato: shape

Fuente: Proyecto Atlas Digital de Costa Rica 2008

Descripción: Se hizo una revisión de las categorías de capacidad de uso de suelo para Costa Rica. Las categorías VII y VIII se consideraron como limitante para el establecimiento de plantaciones puesto que se caracterizan por ser tierras que no reúnen las condiciones mínimas requeridas para cultivo o pastoreo, y solo se pueden utilizar en protección total. En esta capa existe el parámetro de áreas protegidas el cual fue restringido en el modelo. Esta información ha cambiado respecto a su distribución en el país, por lo que análisis posteriores permitirán extraer información más actualizada.

4. Capa de información: Temperatura

Formato: shape

⁴ Un marco de trabajo en común es jerárquicamente significativo cuando se trabaja con rasters provenientes de diferentes fuentes y escalas, siendo a menudo prerrequisito para mejorar tareas de geo-procesamiento

Fuente: Proyecto Atlas Digital de Costa Rica 2014 (IMN: Instituto Meteorológico Nacional) Descripción: Originalmente se encuentra en formato ArcInfo como isoyetas, pero bajo el proyecto TERRA la precipitación se separa y es transformada a formato shape (polígonos).

5. Capa de información: Precipitación

Formato: shape

Fuente: Proyecto Atlas Digital de Costa Rica 2014 (IMN: Instituto Meteorológico Nacional) Descripción: Originalmente se encuentra en formato ArcInfo como isoyetas, pero bajo el proyecto TERRA la precipitación se separa y es transformada a formato shape (polígonos).

6. Capa de información: pH

Formato: shape

Fuente: Harmonized World Soil Database V1.0

Descripción: el HWSD es un raster (30 arc-segundo) con cerca de 15000 diferentes unidades de mapeo de suelo que combina información actualizada a nivel regional y nacional y a escala 1:5000000. Las fuentes de esta capa son SOTER, ESD, Soil Map of China, ISRIC-WISE, FAO/UNESCO Soil Map of the World (FAO, 1971-1981). Los datos fuente fueron recortados a nivel de país y proyectados a coordenadas CRTM05.

7. Capa de información: Mapa digital de suelos de Costa Rica 2013

Formato: shape

Fuente: CIA (Centro de Investigaciones Agronómicas)

Descripción: en 2009 empieza el cambio de información de suelos de formato analógico al digital y en 2013 se lanza el mapa de órdenes y subórdenes de suelos de Costa Rica a escala 1:200000, el cual cuenta con una base de dato de 450 perfiles de suelo.

8. Capa de información: Meses secos

Formato: shape

Fuente: Proyecto Atlas Digital de Costa Rica 2008

Descripción: Originalmente se encuentra en formato ArcInfo, pero bajo el proyecto TERRA el número de meses secos para Costa Rica se separa y transforma a formato shape.

Fue necesario reclasificar todas las variables convirtiendo la información en datos "enteros".

Para determinar el número de clases, se optó por conservar la información fuente, esto debido principalmente a que se quiso mantener las características de las capas originales bajo la resolución más fina (30 m).

Bajo parámetros técnicos, se asignó a cada variable y para cada especie diferentes pesos de acuerdo a su importancia relativa usando una escala común⁵ (cuadro 1).

Para mejorar la distribución de la condición bajo la cual se establecen las especies, además de incluir las ocho variables y sus pesos de acuerdo a su importancia relativa, se determinó tres escenarios bajo los

⁵ Según las características ecológicas y rangos de ocupación de cada especie

cuales se desarrollarían las especies (optimo, medio y deficitario) (Anexo 1). Cabe aclarar que los pesos para los tres escenarios se mantienen.

Cuadro 1. Pesos de acuerdo a la importancia relativa de las variables para teca.

Especie	Variable	Peso
Tectona grandis	Altitud	20
	Meses secos	15
	pH	13
	Sub orden de suelos	12
	Pendiente	11
	Capacidad de uso	11
	Precipitación media anual	10
	Temperatura media anual	8
Total		100

La selección de la mejor condición para Teca (*Tectona grandis* y cuatro especies adicionales) se visualiza para cada variable de acuerdo a la figura 1. Cabe aclarar que las áreas seleccionadas para reforestación con teca, no pueden sustituir áreas cubiertas con bosques (primarios o secundarios); , así como tampoco estarán en áreas protegidas, razón por la cual este informe preliminar es una orientación de las áreas potenciales y a partir de un análisis posterior se permitirá conocer y seleccionar las áreas efectivas que representen la condición respectiva para cada especie.

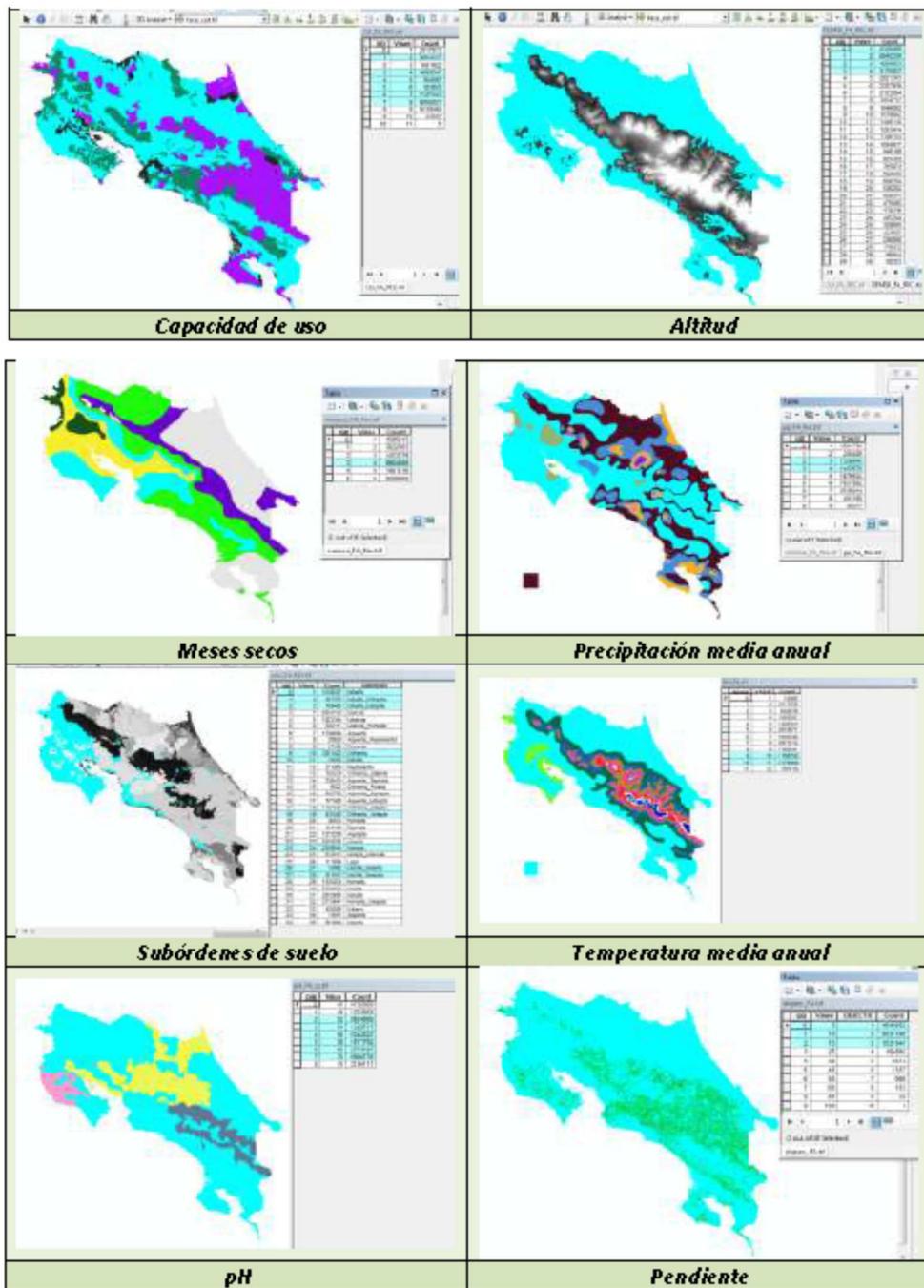


Figura 1. Selección de variables bajo condición "Óptima" para Teca (*Tectona grandis*).

Indicadores (primera aproximación) para especies seleccionadas para reforestación en Costa Rica

Condición		Optimista						Medio						Deficitario							
Especie	Tipo suelos suborden	pH	pendiente	altitud (msnm)	precipitación (mm)	sequía (meses)	Temp	Tipo suelos suborden	pH	pendiente	altitud (msnm)	precipitación (mm)	sequía (meses)	Temp	Tipo suelos suborden	pH	pendiente	altitud (msnm)	precipitación (mm)	sequía (meses)	Temp
Teca	Ustolls, Ustalfs, Ustepts, Orthents	5,1-6,5	<25%	<380	1500-3000	4	24-28	Ustalfs, Ustepts, Orthents	4,9-5,0	25%-30%	<500	2500-3500	4-6	22-30	sin restricción	<4,9	30-35	>500 hasta 600	<1500 o >3500	<3 o >6	<24
Melina	Ustolls, Ustalfs, Ustepts, Orthents, Udulfs, Humulfs	6,0-6,5	<25%	<500	2000-2500	4	24-28	Ustalfs, Ustepts, Orthents, Udulfs	5,5-5,9	25%-30%	<600	1000-4000	4-6	22-32	sin restricción	<5,5	30-35	>600 hasta 800	<1000 o >4000	<2 o >5	<23
Pino	sin restricción	5,0-6,5	<30%	<500	1000-2000	4	24-30	sin restricción	4,0-6,5	<35%	<800	1000-3200	2-6	22-30	sin restricción	<4,0	>35%	>800 hasta 1000	<1000 o >3200	>6	<22
Eucalipto	Ustolls, Ustalfs, Ustepts, Orthents	5,0-6,5	<25%	<600	1000-2500	1-3	22-30	Ustolls, Ustalfs, Ustepts, Orthents	4,8-6,5	25%-30%	500-800	1500-3000	1-3	22-32	sin restricción	<4,8	30-35	<1000	<1500 o >3000	>4	<22
SAF	Aquents, Ustolls, Ustalfs, Ustepts, Orthents, Udulfs, Humulfs	>5,2	<25	<600	1200-1800	2-4	22-28	Aquents, Ustolls, Ustalfs, Ustepts, Orthents, Udulfs,	5,0-6,2	25%-30%	400-800	1800-2500	3-4	20-30	sin restricción	<5,0	30%-35%	<1000	<1200 o >2500	>4	<20

