

**Estimación de la absorción de nutrientes de cedro amargo (*Cedrela odorata* L.)
como mecanismo de diagnóstico para mejorar las recomendaciones de manejo
sostenible de la especie en plantaciones de pequeños agricultores del Programa
Forestal de CoopeAgri R.L, Costa Rica.**

Daniel Ramírez Valerio

**PROYECTO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**ESCUELA DE AGRONOMÍA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS
UNIVERSIDAD DE COSTA RICA**

2014

**Estimación de la absorción de nutrimentos de cedro amargo (*Cedrela odorata* L.)
como mecanismo de diagnóstico para mejorar las recomendaciones de manejo
sostenible de la especie en plantaciones de pequeños agricultores del Programa
Forestal de CoopeAgri R.L, Costa Rica.**

Daniel Ramírez Valerio

**PROYECTO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AGRONÓMICA**



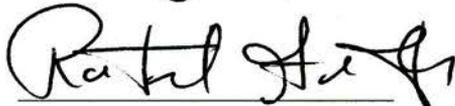
Alfredo Alvarado Hernández, Ph.D

DIRECTOR DE PROYECTO



Luis Salazar Salazar, Lic.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Rafael Mata Chinchilla, MSc.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Rafael Salas Camacho, Ph.D

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Erick Guevara Berger Ph.D

DIRECTOR DE ESCUELA



Daniel Ramírez Valerio

SUSTENTANTE

Dedicatoria

A mí muy amada madre por darme la vida y todo el apoyo durante mis estudios a quien le debo todo lo que soy y todo lo que he logrado, a mis tías y abuela por ser parte importante en mi vida e inculcarme los valores que hoy me reflejan.

Agradecimientos

A Dios por haberme otorgado todo lo necesario para la finalización de este trabajo, Además de manera muy especial le agradezco a don Alfredo Alvarado por ayudarme y guiarme durante todo el proceso de elaboración de este trabajo por sus sabios consejos de interpretación y redacción; a don Luis Salazar y personal de CoopeAgri R.L. por el interés mostrado en el tema y la ayuda que me brindó durante este proceso; de igual forma le agradezco a Rafael Mata y Rafael Salas por la revisión y corrección del documento. Agradezco también a Manuel y Mario por la ayuda y el apoyo otorgado durante la etapa de campo y elaboración del documento, y a todos y cada uno de las personas que hicieron posible la finalización y presentación de este trabajo. A todos ¡MUCHÍSIMAS GRACIAS!

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GENERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
CAPÍTULO 1	4
1. ASPECTOS ECOLÓGICOS.....	4
1.1. DISTRIBUCIÓN Y ECOLOGÍA.....	4
1.2. DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE	5
1.3. CRECIMIENTO Y FORMACIÓN DE LA MADERA	7
2. IMPORTANCIA ECONÓMICA	9
3. NUTRICIÓN.....	10
3.1. CONCENTRACIÓN FOLIAR DE NUTRIMENTOS	11
3.2. VIVERO	14
3.3. PLANTACIÓN.....	15
4. MATERIALES Y MÉTODOS	16
4.1. ÁREA DE ESTUDIO	16
4.2. UNIDAD EXPERIMENTAL	18
4.3. TOMA DE DATOS	18
4.4. ANÁLISIS DE LABORATORIO	20
4.5. TRATAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO	20
CAPÍTULO 2	21
1. PRODUCCIÓN DE BIOMASA TOTAL Y DE SUS COMPONENTES.....	21
1.1. INTRODUCCIÓN	21
1.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
1.3. CONCLUSIONES	30
CAPÍTULO 3	31
1. CONCENTRACIÓN DE NUTRIMENTOS EN LOS COMPONENTES DE LA BIOMASA AÉREA.....	31
1.1. INTRODUCCIÓN	31
1.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
1.3. CONCLUSIONES	45

CAPÍTULO 4	46
1. ACUMULACIÓN DE NUTRIMENTOS EN LA BIOMASA AÉREA	46
1.1. INTRODUCCIÓN	46
1.2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
1.3. PROGRAMAS Y PRÁCTICAS DE FERTILIZACIÓN A PEQUEÑOS PRODUCTORES	59
1.4. CONCLUSIONES	67
3. LITERATURA CITADA	68

Índice de Figuras:

- Figura 1. Diagrama de la distribución mundial de la especie *C. odorata* L. (tomado de Orwa *et al.* 2009).
- Figura 2. Dibujo de diferentes partes del árbol de *C. odorata*. 1. Hábito de crecimiento; 2. Hojas; 3. Flor; 4. Fruto; 5. Semilla (tomado de Lemmens *et al.* 1995; citado por Salazar *et al.* 2000).
- Figura 3. Niveles promedio de concentración foliar de macroelementos considerados adecuados para el crecimiento de varias especies latifoliadas (tomado de Avellán 2012).
- Figura 4. Niveles promedio de concentración foliar de microelementos considerados adecuados para el crecimiento de varias especies latifoliadas (tomado de Avellán 2012).
- Figura 5. Mapa con los puntos en donde se tomaron los muestreos de árboles de *C. odorata* para su análisis
- Figura 6. Datos de promedios mensuales de lluvia y temperatura para la zona de Pérez Zeledón (09° 20' N; 83° 42' O) en el periodo de 1982-1994. (IMN 2014)
- Figura 7. Biomasa seca de árboles de *C. odorata* de acuerdo a su edad según sus principales componentes.
- Figura 8. Modelo de regresión del total de biomasa seca de árboles de *C. odorata* de acuerdo a la edad.
- Figura 9. Relación entre la biomasa seca total y la biomasa seca foliar de árboles de *C. odorata*
- Figura 10. Modelo de regresión lineal con mediciones de diámetro altura de pecho (DAP) de diferentes sitios. México (Murillo 2008)
- Figura 11. Concentración de diferentes macronutrientos en el fuste y las hojas de árboles de *C. odorata* de acuerdo a su edad.
- Figura 12. Promedio de la concentración de macronutrientos en árboles de *C. odorata* para edades de 1 a 19 años. Las barras verticales corresponden al error estándar.
- Figura 13. Promedio de la concentración de micronutrientos en árboles de *C. odorata* para edades de 1 a 19 años. Las barras verticales corresponden al error estándar.

- Figura 14. Modelos de regresión lineal para la concentración de nutrimentos según la edad de árboles de *C. odorata*. Los modelos presentados son validos estadisticamente según el Cuadro 3.
- Figura 15. Modelo de regresión lineal para la concentración de N vs P y N vs S, según los componentes de árboles de *C. odorata* entre 1-19 años de edad.
- Figura 16. Modelos de regresión para la acumulación de N de acuerdo a la edad, en distintos componentes de árboles de *C. odorata*. Los modelos siguen la ecuación $y=a*b^{(edad)}$.
- Figura 17. Modelos de regresión para la absorción de P de acuerdo a la edad, en distintos componentes de árboles de *C. odorata*. Los modelos siguen la ecuación $y=a*b^{(edad)}$
- Figura 18. Modelos de regresión para la absorción de Ca de acuerdo a la edad, en distintos componentes de árboles de *C. odorata*. Los modelos siguen la ecuación $y=a*b^{(edad)}$
- Figura 19. Acumulación de N, Ca y K en diferentes componentes y porcentaje total acumulado en árboles de *C. odorata* con edades entre 1 y 19 años.
- Figura 20. Acumulación de P, Mg y S en diferentes componentes y porcentaje total acumulado en árboles de *C. odorata* con edades entre 1 y 19 años.
- Figura 21. Mapa del orden del suelo en la zona donde se realizaron los muestreos de árboles de *C. odorata* pertenecientes a productores asociados a Coopeagri R.L. (Basado en: Mata et al. 2013)

Índice de Cuadros:

- Cuadro 1. Descripción de sitio y crecimiento de árboles de *C. odorata* según estudios de distintos autores. Tomado de Cintron, 1990. Modificado y aumentado por el autor de este documento.
- Cuadro 2. Concentración de nutrientes en la hoja y pecíolos de *C. odorata* en Australia (Webb *et al.* 2000) y niveles en hojas (Zech y Dreshsel 1992).
- Cuadro 3. Promedio de la biomasa seca de árboles de *C. odorata*, de acuerdo a sus componentes. Costa Rica .2013.
- Cuadro 4. Análisis estadístico para los modelos de biomasa de árboles de *C. odorata* de las Figuras 8 y 9
- Cuadro 5. Regresión lineal entre la concentración de cada elemento en los tejidos de árboles de *C. odorata* y la edad (1-19 años). Los modelos de regresión son de la siguiente forma: $C_n = \beta_1(\text{Edad}) + \beta_0$. Se destacan los modelos validos estadísticamente según $p < 0,05$
- Cuadro 6. Modelos de regresión y parámetros estadísticos de acumulación de macronutrientes de árboles de *C. odorata* con edades entre 1 y 19 años, de acuerdo a cada componente, según la ecuación $y = a * b^{(\text{edad})}$.
- Cuadro 7. Modelos de regresión y parámetros estadísticos de acumulación de micronutrientes de árboles de *C. odorata* con edades entre 1 y 19 años, de acuerdo a cada componente, según la ecuación $y = a * b^{(\text{edad})}$. Valor $p < 0,05$ indica que el modelo es válido.
- Cuadro 8. Cálculo de las entradas de nutrientes en plantaciones de *C. odorata* en la zona sur de Costa Rica.
- Cuadro 9. Cálculo de las salidas de nutrientes en plantaciones de *C. odorata* en la zona sur de Costa Rica.
- Cuadro 10. Cálculo del balance de nutrientes (entradas menos salidas), materias primas y cantidad de fertilizante necesarios para suplir las necesidades nutricionales de *C. odorata* en plantaciones la de la zona sur de Costa Rica

1. Introducción

En México y Centroamérica, de donde es originaria, se hallan unos siete géneros y 300 especies de *Cedrela*, familia Meliaceae, incluyendo la especie *Cedrela odorata* L. conocida como cedro amargo. La especie se distribuye en climas cálidos y semicálidos y crece asociada a los bosques tropicales húmedos y estacionales mixtos, semi-siempre verdes o semi-decíduos, dominados por otras especies en las zonas de vida Tropical y Subtropical (Timyan 1996). La especie se encuentra como individuos esparcidos en suelos como Inceptisoles dísticos y Ultisoles donde su desarrollo en plantaciones se ha visto limitado por el ataque de *Hypsipyla grandella* plaga que afecta a las Meliaceas en general.

La nutrición mineral es una parte importante de la fisiología de los árboles, aceptándose que un adecuado suplemento de nutrimentos es fundamental para un crecimiento óptimo de las especies forestales. Estos nutrimentos tienen diferentes funciones y forman parte de importantes roles en la planta donde son parte de los tejidos, actúan en la catálisis de diferentes reacciones bioquímicas, regulan la actividad osmótica en las células e intervienen en la permeabilidad de las membranas. Como ejemplos se puede mencionar el Ca que constituye parte importante de las paredes celulares, el Mg y el Fe en la molécula de clorofila y el P en los fosfolípidos y nucleoproteínas (Kozłowski y Pallardy 1997). Muchos elementos son requeridos en pequeñas cantidades, ya que forman parte de ciertas coenzimas o sistemas de coenzimas, y algunos como el B, Zn y Cu son tóxicos si se aplican en grandes cantidades. Otros iones tienen como función balancear el exceso o escasez de algún otro elemento y por lo tanto la cantidad de iones en la célula es de suma importancia para el óptimo desarrollo de la planta (Kozłowski y Pallardy 1997; Marschner 2002).

Algunas de las características más obvias de la vegetación y del sitio que afectan la absorción de nutrimentos incluyen: 1) biomasa total; 2) el índice de área foliar; 3) las propiedades físicas de las hojas; 4) la diversidad de especies del sitio, 5) la tasa de

fotosíntesis, 6) la exposición a vientos fuertes, 7) la baja disponibilidad de nutrimentos en el suelo y 8) la baja capacidad de absorción de nutrimentos.

En Costa Rica el fomento para la reforestación inicia a partir de 1979 cuando se pone en marcha el programa de Incentivos Fiscales del Estado y posteriormente con el apoyo de la cooperación de organismos internacionales. En los últimos años, el éxito que ha tenido la venta de bonos de carbono al exterior, ha hecho que muchas empresas privadas se incorporen y desarrollen este mercado, pagando cierto beneficio a los productores. El uso de árboles tanto de bosque como para producción de maderera es una herramienta importante en la fijación (secuestro) de CO₂ atmosférico, el cual se incorpora a la biomasa del árbol, formando alrededor del 50% de esta.

La Corporación Cooperativa CoopeAgri R.L, ubicada en San Isidro del General, se ha destacado por la colaboración y ayuda brindada a diversos productores agrícolas en esta zona, desde el año 1988 se ha interesado en la actividad forestal, creando así el Departamento de Operaciones Forestales para difundir y propiciar el manejo integral y sustentable de los bosques, además de iniciar con distintos proyectos de plantaciones de especies maderables. CoopeAgri R.L. cuenta con más de 11.000 asociados y en los últimos años ha participado en conjunto con los productores de la zona en el establecimiento de más de 600.000 árboles, dentro de los cuales se encuentra el cedro amargo. Es del interés de esta cooperativa trabajar con esta especie, tanto para cultivo asociado en plantaciones de café como para brindar servicios ambientales a diferentes instancias y en este afán les interesa realizar un adecuado manejo en la fertilización de la especie como factor clave para el crecimiento y desarrollo óptimo de las plantaciones. Por estos motivos CoopeAgri R.L. tiene interés de estimar la absorción y distribución de nutrimentos para *C. odorata* y es la principal colaboradora de campo del presente trabajo

Existe escasa información objetiva y con validez relacionada con el desarrollo, producción y correcto manejo de la nutrición de especies forestales, lo que usualmente lleva al productor a realizar estimaciones sobre el análisis beneficio/costo, que muchas veces no se acerca a la realidad. Por esta razón en el presente trabajo de graduación se enfatizará en los aspectos relacionados con la absorción de nutrimentos por *C. odorata*.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Estimar la absorción de nutrimentos de árboles de *Cedrela odorata* L. para mejorar las prácticas de fertilización de pequeños agricultores de Pérez Zeledón, Costa Rica.

2.2 Objetivos específicos

- Conocer la concentración de nutrimentos en las hojas, tronco, ramas primarias y secundarias de árboles con distintas edades
- Estimar la absorción de nutrimentos del árbol de acuerdo a su edad.
- Plantear posibles relaciones entre diferentes partes de la biomasa aérea de acuerdo a la masa acumulada
- Sugerir programas y prácticas de fertilización a pequeños productores de acuerdo a la absorción nutrimentos de la especie.

Capítulo 1

1. Aspectos ecológicos

1.1. Distribución y ecología

De forma natural de *C. odorata* L. se extiende por México, las islas del Caribe, hasta partes de Argentina, Asia e islas del Pacífico (Longwood 1962; Styles 1981) (Figura 1). Según varios autores (Guevara 1988; Asociación Costarricense para el Estudio de Especies Forestales Nativas 1992) la especie es abundante en zonas bajas y pies de monte donde crece en su ámbito natural en las zonas bioclimáticas bh-T, bmh-T, bh-T/bmh-T y bmh-T/bp-T según la clasificación de zonas de vida de Holdridge, a temperaturas entre 24-30°C, 0-1000 msnm y humedad relativa 60-100%. La especie tolera períodos secos prolongados pero no prospera bien en sitios encharcados. En los bosques húmedos se pueden encontrar árboles creciendo de forma aislada y rodeados de otras especies ya sea en zonas planas o con cierto grado de pendiente y en suelos ácidos bien aireados o derivados de rocas volcánicas desde 0 hasta 2000 msnm. Sus requerimiento edáficos son poco conocidos, considerándose que los suelos más favorables son aquellos con pH entre 5 y 7, con buena disponibilidad de elementos como P, K y Ca, drenados y aireados (Cantillo 1992) y en Inceptisoles ándicos con una densidad aparente inferior a 1,15 Mg m⁻³ (Castaing 1982).

Navarro *et al.* (2002) al comparar 63 familias provenientes de 10 poblaciones de *C. odorata* provenientes del 1) pacífico seco y 2) del caribe y pacífico sur de Costa Rica mencionan que los materiales de las dos regiones son estadísticamente diferentes, siendo las semillas del pacífico seco más pesadas, las plántulas más altas y de mayor diámetro y las hojuelas más largas y anchas que las de la otra región. Los autores hipotetizan que estas diferencias dan una ventaja adaptativa incipiente a las plántulas del pacífico seco como mecanismo para aprovechar mejor la poca disponibilidad de humedad de este tipo de ambiente.

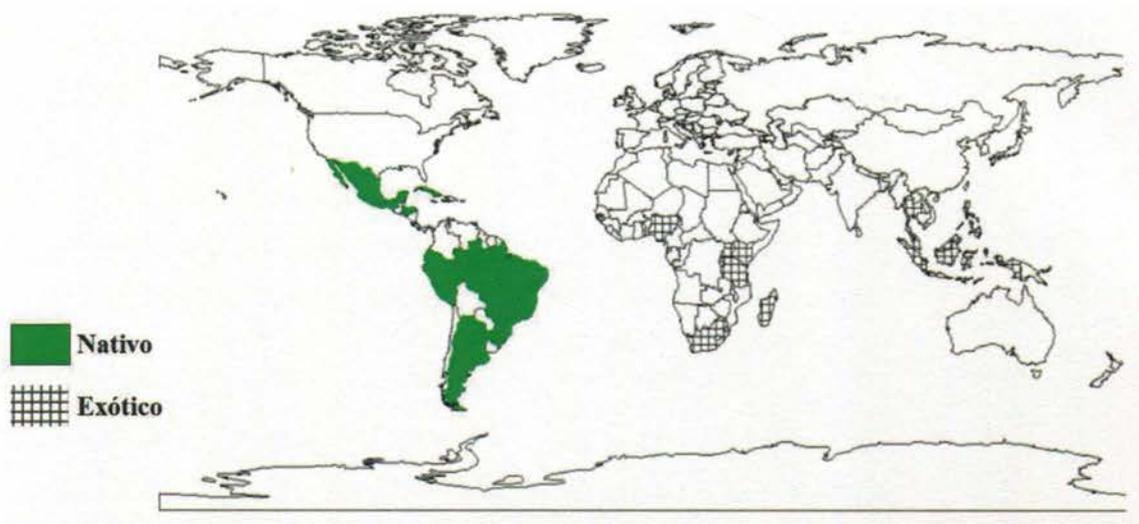


Figura 1. Diagrama de la distribución mundial de la especie *C. odorata* L. (tomado de Orwa *et al.* 2009).

Los árboles de *C. odorata* necesitan de aproximadamente 5 mm de precipitación por mes para la producción de madera y muchas veces durante la época seca puede darse una disminución en el grosor del tronco debido a la pérdida de agua antes del inicio de crecimiento de madera durante la época lluviosa. A diferencia de otras especies, los árboles de cedro amargo pueden incrementar el grosor del tronco a finales de la época lluviosa, cuando las hojas están senescentes, sin embargo este engrosamiento del tronco no se debe a la formación de madera, sino más bien a la acumulación de agua en sus tejidos, la cual utiliza durante la floración y maduración de frutos durante época seca (Worbes 1999).

1.2. Descripción de la especie

- **Familia:** Esta especie pertenece a la familia botánica de la Meliaceae, género *Cedrela* y especie *odorata*
- **Nombres comunes:** En países como México se le llama: Cedro, Cedro mexicano, Cedro colorado; mientras que en Costa Rica y Panamá se le conoce como Cedro o Cedro amargo y en idioma inglés se le denomina “Spanish Cedar”.

- **Forma:** Es un árbol con hojas caducifolias, con una altura de 25 a 35 m y un diámetro a la altura del pecho de hasta 1,6 m.
- **Hojas:** Posee una copa grande, de forma redondeada, robusta y extendida; las hojas son paripinnadas con peciolo que tienen una longitud de 15 a 55 cm. Compuesto de 10 a 22 folíolos opuestos o alternos y forma lanceolada. (Figura 2).
- **Tronco y ramas:** El tronco es recto y robusto, que en ocasiones forma pequeños contrafuertes en su base de aproximadamente 1 m de altura. Las ramas poseen un crecimiento ascendente, son gruesas y de forma arqueada.
- **Corteza:** La corteza externa tiene gran cantidad de fisuras, es de color pardo grisáceo o rojizo, mientras que la corteza interna posee una coloración rosada, es fibrosa y amarga de aproximadamente 20 mm de grosor total.
- **Flores:** Crecen en forma de panícula terminal, de alrededor de 15 a 30 cm de largo, poseen cinco pétalos, con cáliz en forma de copa y corola verde amarillento y aroma suave. Es una especie monoica, con floración anual regular a partir de los diez años y normalmente se da al inicio de la época lluviosa (en Costa Rica alrededor de marzo y junio) (Salazar *et al.* 2000).
- **Frutos:** Péndulos con cápsulas leñosas dehiscentes con cinco lóculos y de 2,5 a 5 cm de largo; poseen un fuerte olor y producen un exudado blanco acuoso cuando estos se encuentran inmaduros, contiene alrededor de 20 a 30 semillas y permanece en el árbol por algún tiempo (CONABIO 1999).
- **Semillas:** Presentan forma ovoide, con una ala lateral membranosa, de 2 a 3 cm (incluyendo la semilla). La testa es de color castaño, posee una capa delgada de endospermo firme, amargo y de color blanco opaco (Figura 2).



Figura 2. Dibujo de diferentes partes del árbol de *C. odorata*. 1. Hábito de crecimiento; 2. Hojas; 3. Flor; 4. Fruto; 5. Semilla (tomado de Lemmens *et al.* 1995, citado por Salazar *et al.* 2000).

1.3. Crecimiento y formación de la madera

En suelos franco-arcillosos con buen drenaje localizados en las zonas bajas donde esta especie tiende a tener un crecimiento rápido alcanzando 2m de altura a los tres años de sembrado (Tymian 1994). Después de los 25 años, una plantación puede crecer alrededor de 32 m de altura, dando como resultado un incremento anual de $12,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de madera (Lamb 1968, citado por Tymian 1994). Se han notado mayores aumentos en el crecimiento de *C. odorata* cultivada bajo policultivo en asocio con otras especies forestales, potreros o sistemas agroforestales, en comparación con la cultivada bajo sistemas de monocultivo (Castaing 1982; Alvarado 2012). En Costa Rica se ha demostrado que crece cinco veces

más rápido cuando se siembra en sistemas mixtos que en monocultivo, lo anterior debido a una reducción del crecimiento causada por el ataque de *H. grandella* y menos competencia intra-específica (Piotto *et al.* 2004).

Cuadro 1. Descripción de sitio y crecimiento de árboles de *C. odorata* según estudios de distintos autores (modificado de Cintron, 1990 y aumentado por el autor).

Localidad	Precipitación (mm)	Edad (años)	Espaciamiento (m)	D.A.P. (cm)	Altura (m)	Crecimiento anual (mm)	Referencia
Puerto Rico	1900	8,0	2,4	4,4	4,5	5,6	Whitmore 1978
Costa de Marfil	1300 a1500	7,5	nd	18,2	13,7	24,3	Delaunay 1978
Nigeria	1600	7,5	3,6	23,9	14,8	31,9	Egenti 1978
Tanzania	1450	5,6	4	16,1	12,5	28,8	Rosero 1976
México	1200	8,0	0,5	12,0	10,0	15,0	Wadsworth 1960
Ecuador	1200	6,0	2 x 4	24,0	18,0	40,0	Wadsworth 1960
Jamaica	2500	5,0	2,5	8,0	nd	16,0	Wadsworth 1960
México	1100	8,0	3	11,0	6,0	14,0	Wadsworth 1960
México	900	12,0	1	8,0	21,0	6,7	Wadsworth 1960
Panamá	2600	12,0	1,5 x 3	24,0	15,0	20,0	Wadsworth 1960
Honduras	1800	13,0	1,5 x 3	28,0	23,0	21,5	Wadsworth 1960
Trinidad y Tobago	2400	15,0	nd	32,0	25,0	21,3	Wadsworth 1960
Ecuador	1200	18 a 20	3,0	50,0	25,0	25,0	Wadsworth 1960
México	738	3	4,5	5,17	6,3	17,2	García <i>et al.</i> 2008
México	1700	3 a 4	nd	10,5	10,8	30,0	Alderete <i>et al.</i> 2010
México	800	3	2,3 x 4	11,7	7,85	33,4	Muñoz <i>et al.</i> 2011
Honduras	2800	20	17,0	75,4	21,9	215,4	Viera y Pineda 2004

El Cuadro 1 muestra los resultados de las mediciones dasométricas realizadas en plantaciones de *C. odorata* en algunos países por varios autores, las cuales concuerdan en la diferencia que existe en el crecimiento de los árboles según las características del sitio y el manejo que se le dé a la plantación de cedro; además pone en evidencia la adaptabilidad de la especie para el crecimiento en distintos sitios con un rango amplio de precipitación anual.

Dunish *et al.* (2002) en un estudio sobre la dinámica de crecimiento del cambium en árboles de cedro midieron el diámetro y extrajeron tejido de árboles de diferentes edades

en la Amazonia y encontraron dentro del xilema fibras colocadas de forma alterna y vasos rodeados de parénquima, mientras que los canales de resina aparecían de forma ocasional y que en las curvas de incrementos de diámetro muestran el crecimiento anual de la especie. Dunish et al. (2003) también cuantificaron el incremento en el ancho de los anillos del xilema de árboles de *Swietenia macrophylla* y *C. odorata* mediante métodos dendrológicos en un bosque primario cerca de Mato Grosso, Brasil; se pudo observar que el crecimiento en los anillos de *S. macrophylla* se da durante casi todo el año y exclusivamente en madera adulta, mientras que en árboles de *C. odorata* esto sucede solamente en la época lluviosa y además los anillos de crecimiento se pueden formar cuando la madera se encuentra tanto en estados juveniles como en estados adultos o maduros.

2. Importancia económica

La madera de cedro amargo presenta gran valor comercial y por sus características se ha utilizado a través de los años en la elaboración de muebles, lanchas, puertas e instrumentos musicales; por su aroma y sus propiedades de conservación de humedad se ha utilizado en la fabricación de cajas de cigarros, armarios y cajas para almacenamiento (Timyan 1994; Arnáez y Flores 1988). En muchos países la especie es utilizada para protección del viento en fincas o como sombra en cultivos de café, sus ramas pueden ser aprovechadas para leña y combustión y sus flores son ricas en néctar, razón por la cual durante la floración del árbol llegan gran cantidad de abejas, convirtiéndose en un buen recurso para la producción de miel.

El cedro amargo tiene potencial para la reconversión de terrenos que han sido abandonados para agricultura. Ramírez *et al.* (2008) determinaron la factibilidad que existe de convertir terrenos que ya no eran utilizados para realizar labores agrícolas en plantaciones forestales de *C. odorata*, en Tamaulipas, México, teniendo como resultados a los tres años de sembrados los árboles un 93% de supervivencia y un crecimiento promedio anual de 1,46 m y diámetro (DAP) de 1,72 cm.

Con el auge que ha tenido las ventas de bonos de carbono, el cultivo y producción de especies forestales ha venido creciendo en los últimos años, ya que no solo se le paga al productor por la madera de los árboles, sino también por distintos lapsos de tiempo en los que tiene el árbol creciendo en sus fincas. Esto ha cambiado de forma significativa el tiempo que tarda el agricultor en alcanzar la tasa de retorno del cultivo, que en especies forestales llega a ser uno de los factores limitantes en su producción.

3. Nutrición

Según Castaing (1982), el crecimiento de *C. odorata* se afecta de manera negativa por condiciones físicas del suelo limitantes como anegamiento; el mismo autor menciona que aumentos en la densidad aparente del suelo afectaron negativamente la altura total, el diámetro de altura de pecho, el área basal y el volumen de la especie. Así, *C. odorata* se ve favorecida en su desarrollo en regiones con una estación seca definida o en terrenos elevados con buen drenaje natural y en sitios de alta precipitación pluvial con suelos bien drenados; el autor también señala que la especie habita más en suelos arcillosos que arenosos y abunda en suelos profundos y porosos derivados de materiales calcáreos.

Los requerimientos de NPK de *C. odorata* de un año y medio de edad fueron estimados por Pérez (2009) en plantaciones creciendo en suelos ácidos (Acrisol distri-hiperférrico, según WRB) en Tabasco, México. Para esto el autor aplicó dosis 10, 20, 35 y 50 g por árbol de fertilizante 17-34-30 y evaluó la altura y diámetro de los árboles, siendo la dosis de 35g la que presentó un mejor desarrollo aéreo y radical de las árboles y al comparar lo extraído por cada árbol de caoba de la misma edad, encontró que el cedro crece más y su extracción de N y K es mayor, duplicando la extracción de la caoba.

Se ha propuesto que la eficiencia en el uso de nutrimentos, principalmente N y P, está ligada al hábito de crecimiento de las hojas; de esta forma las especies con hojas deciduas

son menos eficientes en el uso de nutrimentos y fotosíntesis que las de árboles que poseen hojas perennes (DeLucia y Schlesinger 1995). Sin embargo en especies tropicales este comportamiento no es tan evidente (Hiremath 2002) habiéndose encontrado que entre tres especies forestales, incluida *C. odorata* con hojas de lapso de vida corto, esta especie tiene la mayor eficiencia en el uso de N, atribuyéndose este comportamiento a las características propias de las hojas de cada especie. En sistemas agroforestales de cedro en asocio a alguna otra especie agrícola, se pueden ver diferencias en los rendimientos de ambos cultivos. Además, tanto los contenidos de materia orgánica como P y K en el suelo en plantaciones de cedro son mayores en comparación a ciertos monocultivos agrícolas debido a la descomposición de la hojarasca, la cual puede llegar alcanzar las $12 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Maldonado *et al.* 2006).

Hall *et al.* (2011) evaluaron el crecimiento y sobrevivencia de cuatro especies forestales en parcelas de diferentes productores en dos zonas con clima tropical seco de Panamá durante cinco años incluyendo entre ellas *C. odorata*; los autores encontraron que en la zona de Los Santos una disminución en la sobrevivencia de los árboles se pueden atribuir al poco fósforo disponible en el suelo.

3.1. Concentración foliar de nutrimentos

Existen pocos estudios sobre valores de deficiencia foliar de *C. odorata*, por el contrario una excelente descripción de los síntomas de deficiencia foliar de la especie a nivel de vivero que se pueden encontrar en el trabajo de Webb *et al.* (2001). Asimismo Webb *et al.* (2000) encontraron para la predicción de respuesta a la fertilización, muestras de los pecíolos son más adecuados que el tejido foliar, pues muestran la cantidad absorbida en función de la aplicada (Cuadro 2) ya que la concentración en el tejido foliar a menudo no muestra la razón de la respuesta en el crecimiento, probablemente por efecto de crecimiento (dilución).

Cuadro 2. Concentración de nutrimentos en la hoja y pecíolos de *C. odorata* en Australia (Webb *et al.* 2000) y niveles en hojas (Zech y Dreshsel 1991).

Elemento	Unidades	Tejido analizado			Niveles en la hoja		
		Hoja	Pecíolo	Deficiencia	Bajo	Intermedio	Alto
N	(%)	3,5	1,23	1,42		3,07	
P	(%)				0,1	0,23	
K	(%)	2,03	2,25		0,92	2,44	
Ca	(%)	1,23	0,76			1,27-1,79	
Mg	(%)	0,27	0,18			0,24-0,28	
S	(%)	0,42	0,13	nd	nd	nd	nd
Fe	(mg kg ⁻¹)	70	33			148	393
Mn	(mg kg ⁻¹)	24	10	22	25	nd	
Zn	(mg kg ⁻¹)	28,1	45,5			14-17	
Cu	(mg kg ⁻¹)	11,3	13,6	2		6	
B	(mg kg ⁻¹)	37,3	19,8			27	
Al	(mg kg ⁻¹)	66	24			148	562
Na	(mg kg ⁻¹)	862	1.166				

En la Figura 3 se puede observar la concentración de macroelementos foliares que se consideran adecuadas para el óptimo desarrollo de algunas especies forestales incluidas entre ellas *C. odorata*, la cual requiere una cantidad intermedia de nutrimentos en comparación con otras especies, siendo superada solo por el laurel (*Cordia alliodora*) en las necesidades de Ca, K y Mg, mientras que los requerimientos de N y P son mayores para el jaúl (*Alnus acuminata*). De acuerdo a esta Figura se puede decir que en árboles de cedro la necesidad de macronutrimentos para un óptimo desarrollo ordenados de manera descendente sería $N > K > Ca \gg Mg > P$.

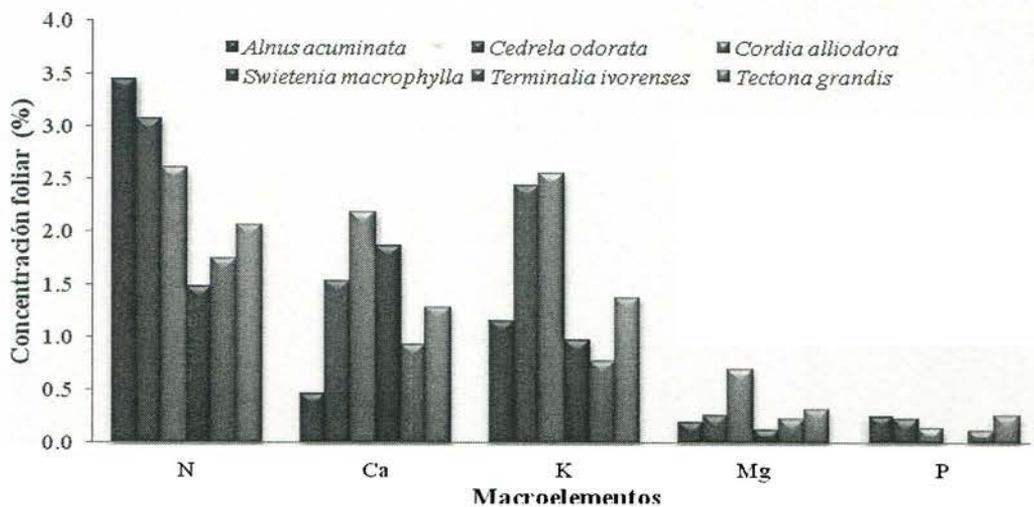


Figura 3. Niveles promedio de concentración foliar de macroelementos considerados adecuados para el crecimiento de varias especies tropicales latifoliadas (tomada de Avellán 2012).

En cuanto a la cantidad micronutrientes que se considera adecuada para un buen desarrollo de los árboles de *C. odorata* (Figura 4) se puede mencionar que en comparación con otras especies arbóreas requiere una concentración intermedia de Fe, Al y B para su desarrollo; sin embargo para el Mn y el Zn posee la menor concentración en el tejido foliar, por lo tanto sus requerimientos de estos dos últimos elementos son menores. Además las concentraciones de Fe y Al en el tejido foliar son bastante altas si se compara al resto de los microelementos, llegando a una concentración de aproximadamente 150 mg kg^{-1} de tejido analizado, mientras que para el Mn, B y Zn el rango de concentración en el tejido es de alrededor de $20\text{-}30 \text{ mg kg}^{-1}$.

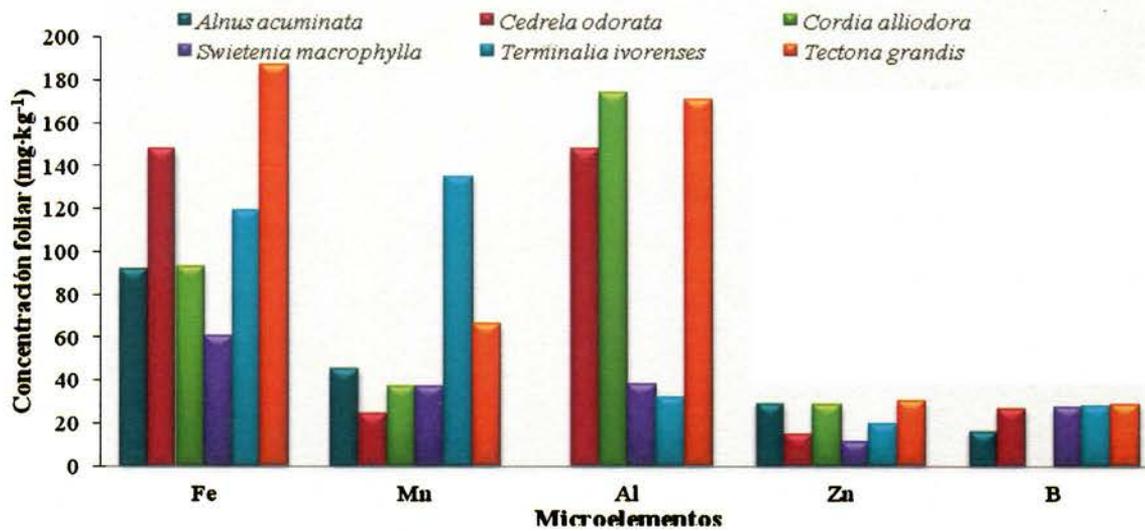


Figura 4. Niveles promedio de concentración foliar de microelementos considerados adecuados para el crecimiento de varias especies tropicales latifoliadas (tomada de Avellán 2012).

3.2. Vivero

Las semillas de *C. odorata* tiene un bajo porcentaje de germinación lográndose una mayor eficacia en la germinación durante la etapa de vivero al utilizar arena como sustrato (Mena *et al.* 2000). Mateo *et al.* (2011) plantaron un ensayo donde se usó como sustrato 70% aserrín y 30% sustrato orgánico con diferentes dosis de fertilizante (15% N, 9% P₂O₅, 12% K₂O) de lenta liberación, teniendo como mejor resultado a los tres meses y medio de edad de la planta, tanto para altura y diámetro del tronco como por factibilidad económica una dosis de fertilizante de 9 kg m³ de sustrato mientras que una dosis de 12 kg fertilizante m³ presentó cierta toxicidad sobre los árboles.

Paniagua (2004) en un ensayo en invernadero con plántulas de cedro utilizó como sustrato suelo ácido y bajo en P disponible (Fluventic Dystropepts), al que se le adicionó diferentes cantidades de CaCO₃ con una base de N y K y por aparte también se comparó la adición de 0, 140, 280 y 560 kg P₂O₅ ha⁻¹; como resultado de la adición de cal el pH aumentó de 4,4 a 5,1, el contenido de Ca intercambiable de 1,4 a 4,6 cmol L⁻¹, la acidez

disminuyó de 2,75 a 0,50 cmol L⁻¹ y con la adición de P aumentó su contenido disponible de 3,4 a 9,8 µg ml⁻¹ (extraído con Olsen mod.). Debido a los cambios en el suelo, las plántulas de *C. odorata* presentaron un incremento positivo y significativo en altura, en diámetro y biomasa aérea y radical cuando se adicionó cal y significativo y positivo solo cuando se adicionó 560 kg P₂O₅ ha⁻¹. En general, la aplicación de cal al sustrato causó un mejor efecto sobre las variables de crecimiento de las plántulas que la adición de P y el único cambio positivo observado a nivel foliar fue el incremento de la concentración de Ca de 1,1 a 2,5%.

3.3. Plantación

Varios autores coinciden en utilizar abonos químicos a base de N, P y K al establecimiento de la plantación con lo cual aumenta las tasas de sobrevivencia y mayor crecimiento de altura y de diámetro. Pérez (2009) al comparar la respuesta de *C. odorata* a la adición de 20, 35 y 50 g árbol⁻¹ del fertilizante 17-34-30 en un suelo ácido (Acrisol distri-hiperférrico) de sabana en Tabasco, México previamente encalado con 300 g cal árbol⁻¹ obtuvo respuesta significativa en altura con la aplicación de 35 g árbol⁻¹. Se ha encontrado respuesta a la aplicación de 50 g de 10-30-10 o 12-24-12 al momento de establecer la plantación (CONAFOR 2000), sin embargo las dosis a utilizar varían con la fertilidad natural del suelo de manera que cuando la fertilidad es baja se recomienda adicionar 80 g árbol⁻¹ y luego una segunda fertilización 120 g árbol⁻¹ de 10-30-10 a los seis meses de edad (Montagnini et al. 1993).

La respuesta a la fertilización de *C. odorata* puede verse afectada por el daño causado por el insecto *H. grandella*, que ataca los ápices de crecimiento, reduciendo su altura y provocando que los árboles tiendan a acumular más carbohidratos en el sistema radical y a producir nuevos brotes (Haggar y Ewel 1995). Con el fin de observar durante cuatro años el efecto de la fertilización sobre el crecimiento de la especie y su efecto en la recuperación al ataque del insecto, Guevara (1988) aplicó los siguiente tratamientos de fertilizante: 1) 15-

15-15 (50 g) + urea (50 g), 2) 15-15-15 (100 g) + urea (50 g), 3) 15-15-15 (50 g), 4) 15-15-15 (100), 5) urea (50 g) y 6) testigo; sin encontrar repuesta a la adición de los fertilizantes aunque si un mejor crecimiento de la especie por lo que recomiendan la aplicación de fertilizante al momento del trasplante (Guevara 1988).

En un experimento realizado en Australia en un Tropeptic Haplorthoxs, Webb *et al.* (2000) encontraron que *C. odorata* mostró incrementos marcados y significativos ($P < 0,10$) en altura y volumen como respuesta a la adición de niveles crecientes de P al suelo (0, 60, 150 y 300 g P por árbol) durante el período entre 9 y 38 meses de aplicado el elemento como superfosfato triple. En el trabajo se encontró que el mayor volumen se obtiene con la adición de 75 g P por árbol, obteniéndose incrementos de volumen sobre el testigo del 167%. Los autores encontraron que la adición de P al suelo no elevó los contenidos de P en las hojas (efecto de dilución), pero sí lo hicieron aumentar cuatro veces la concentración en los pecíolos, necesitándose valores de 0,30% P en los pecíolos para obtener el 90% del crecimiento máximo.

4. Materiales y Métodos

4.1. Área de estudio

Para el presente trabajo, se muestrearon árboles en 15 plantaciones de cedro amargo (*C. odorata* L.) en dos regiones de Costa Rica: (1) la cuenca del río Grande de Térraba y (2) las llanuras caribeñas. Los primeros árboles se cortaron en diferentes fincas de productores asociados a CoopeAgri R.L, San Isidro del General con edades de entre 1 a 10 años (Figura 5). Posterior a esto se recolectaron árboles de 5, 14 y 19 años de edad en una finca experimental de la Escuela Agrícola Regional del Trópico Húmedo (EARTH), esto debido a la dificultad de conseguir árboles de estas edades en fincas asociadas a CoopeAgri R.L.

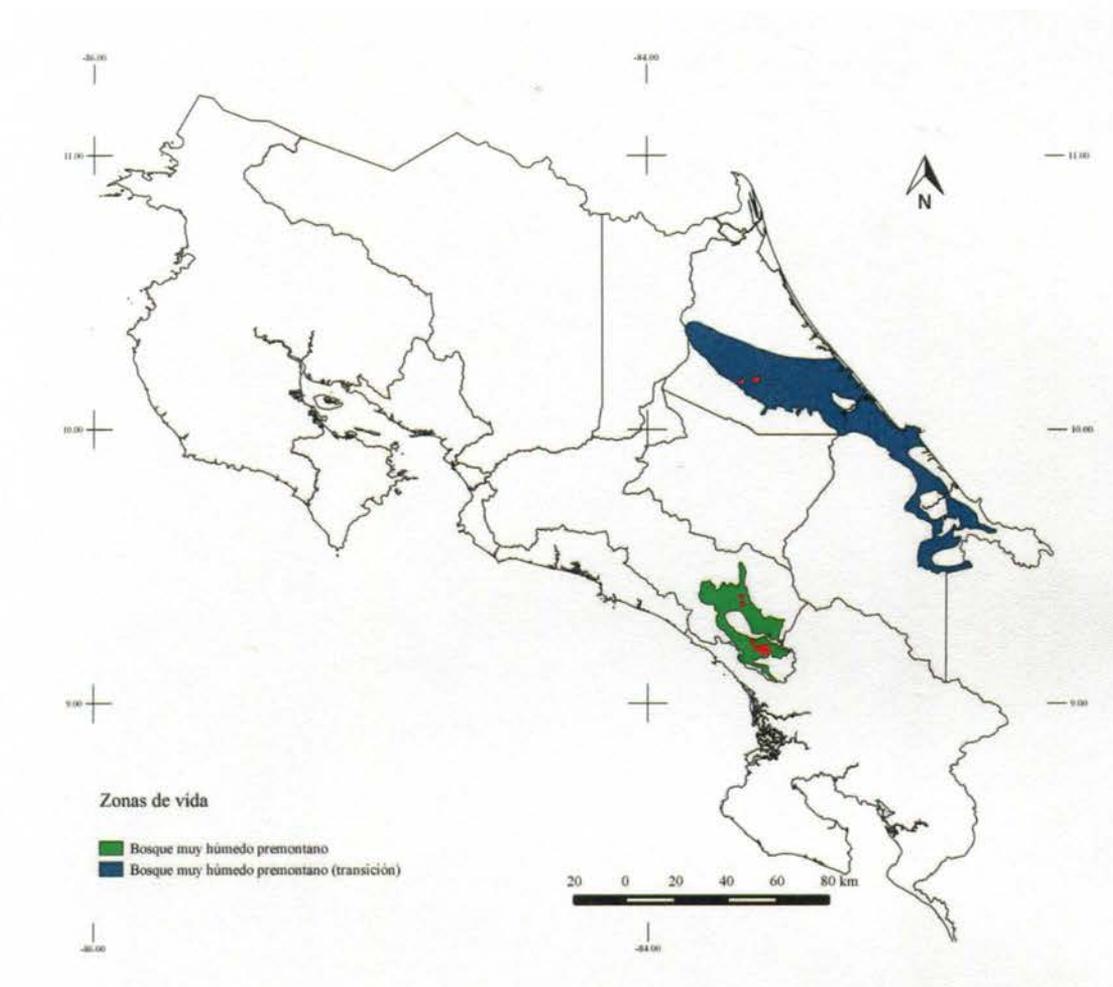


Figura 5. Mapa con los puntos en donde se tomaron los muestreos de árboles de *C. odorata* por zona de vida para su análisis.

Ambos sitios se encuentran dentro del bosque muy húmedo premontano, donde las lluvias oscilan desde los 2000 hasta 4000 mm anuales y la temperatura promedio anual entre 18 y 24°C (Bolaños *et al.* 2005). A pesar de lo elevado de la precipitación, la distribución de la lluvia durante el año es bimodal, con un período seco de diciembre a marzo y otro húmedo durante el resto del año y en el cual también disminuye la temperatura debido a la elevada nubosidad (Figura 6).

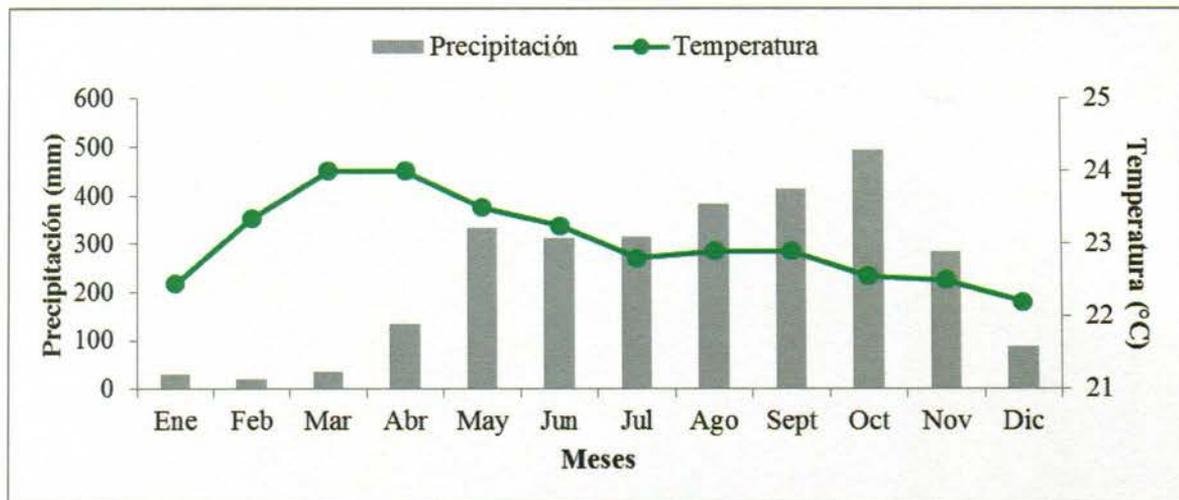


Figura 6. Datos de promedios mensuales de lluvia y temperatura para la zona de Pérez Zeledón (09° 20' N; 83° 42' O) en el periodo de 1982-1994. (IMN 2014)

4.2. Unidad experimental

El muestreo de los árboles de *C. odorata* se llevó a cabo en sitios con suelos clasificados como Ultisoles; en varios de los sitios los árboles muestreados se encontraban intercalados en sistemas agroforestales con pastos (árboles de 4, 7 y 8 años) y plantaciones de café, mientras que en otros casos se muestrearon plantaciones puras. Se muestrearon individuos de crecimiento y desarrollo promedio en comparación a los demás árboles del sitio, que el nivel de competencia por espacio y luz fuera homogéneo, sin ningún problema fitosanitario ni bifurcación en el tronco, ni árboles de los bordes de caminos o de la parcela. Lo anterior con el fin de adecuarse mucho mejor a las prácticas de selección de árboles para muestreos en diferentes empresas forestales del país, en donde recurren a la experiencia del personal para conocer un árbol representativo de toda la parcela.

4.3. Toma de datos

Una vez escogido el árbol indicado a éste se le midió el diámetro a altura de pecho (DAP) y posteriormente se cortaron lo más cercano posible al suelo; con el árbol sobre el suelo se midió su altura y se separaron los siguientes componentes de la biomasa aérea:

Ramas primarias:

Una vez que el árbol fue volcado se separaron las ramas primarias del tronco estas fueron pesadas para conocer su peso fresco, posteriormente se colocaron en una carpa donde se les hicieron cortes con la motosierra para obtener una muestra de aserrín, la cual fue homogenizada para que sea una muestra representativa de aproximadamente un kilogramo, siendo colocada una bolsa hermética debidamente rotulada.

Ramas secundarias:

Estas se separaron de las ramas primarias y se pesaron con el fin de conocer su peso fresco, una vez hecho esto se colocaron en un toldo para sacar aserrín y homogenizarlo, posteriormente se tomó una muestra representativa de aproximadamente un kilogramos y se colocó en una bolsa hermética rotulada.

Tronco:

El tronco de cada árbol se cortó en secciones para facilitar el pesaje y conocer su peso fresco, una vez anotado esto, los troncos se colocaron sobre una lona y se hicieron cortes transversales con la motosierra para obtener aserrín, el cual se homogenizó para obtener una muestra representativa del tronco de aproximadamente un kilogramo, esta se colocó en una bolsa hermética debidamente rotulada.

Hojas:

Finalizada la separación de ramas primarias y secundarias, las hojas de todo el árbol fueron separadas de forma manual y colocadas en una carpa para pesarlas y homogenizarlas. Se tomó una muestra de aproximadamente un kilogramo, colocándose en bolsas herméticas rotuladas.

Pecíolos:

Todos los pecíolos se separaron de las ramas del árbol y se anotó su peso fresco, hecho esto una muestra representativa de aproximadamente un kilogramos se tomó y se puso en

una bolsa hermética. Este tipo de muestra se hace necesario ya que se ha notado en el campo que la velocidad de descomposición del mismo es mucho más lenta que la de las hojas pudiendo denotar diferencias en concentración de nutrimentos o en su defecto de otros compuestos orgánicos “más duros”.

4.4. Análisis de laboratorio

Las muestras frescas de los diferentes componentes de la biomasa aérea recolectados se pesaron y se enviaron al Laboratorio de Suelos y Foliareos del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica donde se colocaron en una estufa a 70°C por un período de 48 horas para determinar el peso seco con una balanza digital con precisión de 0,01 g. Con base en el peso seco y peso fresco se determinó el porcentaje de humedad de los diferentes componentes y calculó el peso seco total para cada uno. Las muestras fueron posteriormente digeridas con ácido nítrico y en la solución resultante se determinó por digestión húmeda con espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado (ICP) el contenido de P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al (Kalra 1998). En el caso del N las muestras se analizaron por el método de combustión en seco (Dumas) en un auto-analizador con incineración a 500°C.

4.5. Tratamiento de datos y análisis estadístico.

Una vez que el laboratorio procesó todas las muestras y se obtuvieron los resultados de los análisis, se procedió a realizar una base de datos en una hoja de cálculo, con el fin de llevar a cabo las operaciones requeridas para obtener los datos necesarios para su correcta interpretación y análisis. Los datos se procesaron con el programa InfoStat para su análisis estadístico y para la realización de gráficos se utilizó Microsoft Excel 2010 y SigmaPlot 11.

Capítulo 2

1. Producción de biomasa total y de sus componentes

1.1. Introducción

Conocer la biomasa aérea de los diferentes componentes de árboles de *C. odorata* permite tener una mejor idea sobre el desarrollo y crecimiento de los individuos y además, comparar como su comportamiento de acuerdo a las condiciones ambientales, suelo y manejo propias de las zonas donde crece la especie. La producción de biomasa seca depende principalmente de la superficie fotosintética, de la capacidad del árbol para la fijación de CO₂ (Kozlowski y Pallardy 1997) y del efecto que tengan las plagas sobre la plantación, factores determinantes para un óptimo desarrollo de la especie y la producción de madera. El estudio del comportamiento de la biomasa seca del árbol también permite detallar un poco más y aproximar al momento oportuno donde se deben realizar ciertas labores de mantenimiento y manejo de la plantación, como la densidad de siembra, fertilización, control de plagas y malezas, podas y aclareos, entre otras

1.2. Resultados y discusión

Los resultados que se presentan y discuten a continuación permitirán tener información técnica y práctica al personal de CoopeAgri R.L encargado del asesoramiento y manejo de las plantaciones de *C. odorata* en esta zona y bajo las condiciones climáticas que ahí predominan. Se entiende además que muchos de los datos obtenidos son el resultado de muestreos de árboles que se encuentran expuestos a diferentes condiciones ambientales que favorecen o perjudican su desarrollo durante todo su crecimiento.

Si se compara la biomasa seca de los diferentes componentes de los árboles de *C. odorata* en relación con la biomasa del fuste (Cuadro 2) se puede observar de manera general que los valores de estas relaciones tienden a disminuir con la edad, lo cual indica que la biomasa seca de cada uno de estos componentes crece a un ritmo más lento en

comparación al crecimiento de la biomasa seca del fuste y esto se hace más evidente conforme aumenta la edad de los árboles y por ende con la producción de madera.

En el Cuadro 3 se muestran los valores de biomasa seca de acuerdo a los componentes de los árboles muestreados, notándose que la biomasa de cada uno de los componentes y su sumatoria (biomasa total) aumenta según incrementa la edad de los árboles. Además la relación de hojas y fuste (H/F) tiende a disminuir según aumenta la edad de los árboles, al igual que la relación entre follaje y madera ((H+P)/(F+R)) lo que indica una reducción en la masa de las hojas y los pecíolos del árbol con respecto a un aumento en la masa de madera.

Varios estudios concuerdan en que existe una disminución en la relación follaje/madera según aumenta la edad de los árboles, en *Betula* spp y *Pinus taeda* (Switzer *et al.* 1968), *Pinus elliottii* (Dickens, *et.* 2004) y *Tectona grandis* (Portuguez 2012). Hase y Foster (1983) encontraron una relación de 0,42 en árboles de 4 años y de 0,20 en árboles de 9 años de manera similar a lo encontrado en plantaciones de jaúl en Costa Rica por Segura *et al.* (2005).

Cuadro 3. Promedio de la biomasa seca de árboles de *C. odorata* de acuerdo a sus componentes. Costa Rica 2013.

Edad (años)	Biomasa seca (kg)							
	Hojas	Pecíolos	Ramas	Fuste	Total	H/F	R/F	(H+P)/(F+R)
1	0,1	0,1	0,0	0,3	0,5	0,41	0,00	0,77
3	1,3	0,4	1,5	5,7	8,9	0,23	0,26	0,24
4	1,0	0,3	23,0	38,3	62,6	0,03	0,60	0,02
5	4,3	0,9	29,8	60,8	95,8	0,07	0,49	0,06
7	2,7	0,1	17,2	45,6	65,7	0,06	0,38	0,05
8	4,4	1,6	62,3	62,9	131,2	0,07	0,99	0,05
9	6,4	1,9	36,2	86,0	130,5	0,07	0,42	0,07
10	7,3	4,0	70,7	122,8	204,8	0,06	0,58	0,06
14	7,7	3,0	22,0	320,1	352,8	0,02	0,07	0,03
19	5,7	2,1	6,9	378,5	393,2	0,01	0,02	0,02

Al estudiar la relación $(H+P)/(F+R)$ se nota que a edades tempranas (0-3 años) la cantidad de tejido fotosintetizador (hojas y pecíolos) es elevada en relación al tejido leñoso (ramas y fuste) y a partir del año 4 se reduce a valores entre 0,02 y 0,07, indicando que se produce mucho más madera que tejidos blandos, los cuales se ven suprimidos por competencia intraespecífica en plantaciones forestales, cabe preguntarse si seleccionando individuos con mejor relación $(H+P)/(F+R)$ podría mejorarse más aún la productividad de los sitios.

En la Figura 7 se pueden observar tres etapas de crecimiento a partir del momento de la plantación en el campo: 1) desde la edad de 0 a 3 años cuando la producción de biomasa aérea del árbol crece de forma lenta; 2) de los 4 y hasta alrededor de los 9 años cuando la biomasa de fuste y ramas crece de forma moderada y 3) a partir de los 10 y hasta los 19 años cuando la biomasa aumenta hasta alcanzar alrededor de los 400 kg por árbol. La biomasa total aumenta en función de la edad de los árboles pero se ve afectada por efecto de sitio y manejo de la plantación (caso de los árboles de 0 a 5 años de edad vs árbol de 7 años de edad); en la situación del árbol de 7 años la producción de biomasa aérea se afectó negativamente por estar asociado con un monocultivo y en un área pequeña.

En la **primera etapa** el crecimiento es lento, aunque se ha reportado que el desarrollo inicial de *C. odorata* es ligeramente superior al de otras especies nativas como *P. quinata*, *S. saman* y *T. rosea* (Hall *et al.* 2011), hecho explicable ya que cuando se planta en fincas de agricultores en vez de campos experimentales el crecimiento se reduce (caso del presente trabajo) mostrando así que las prácticas de manejo a nivel de finca son determinantes en parámetros de rentabilidad comercial (Hall *et al.* 2011). Durante la primera etapa los arbolitos deben competir con la maleza por agua y nutrientes (normalmente de gramíneas) y a menudo efectos alelopáticos de estas y otras especies; Andrés *et al.* (2011) mencionan que las plántulas de *C. odorata* se ven favorecidas por la eliminación de malezas y que crecen más cuando se mantienen a la sombra y sin restricciones de humedad, siempre y cuando los suelos en que se planta no estén altamente

degradados. Delagrangue *et al.* (2008) realizaron estudios de la acumulación de biomasa durante los tres primeros años de crecimientos de cinco especies forestales dentro de la cuales se incluyó *C. odorata*, concluyendo que la variación en la biomasa está relacionada a corto plazo con la intercepción de luz y eficiencia de uso del N, mientras que a largo plazo esta eficiencia se relaciona más con la disponibilidad de agua en el suelo. Es en esta etapa de crecimiento donde la probabilidad de respuesta a la adición de fertilizantes puede ser muy beneficiosa (Pérez 2009)

A partir de los tres años (**segunda etapa** de crecimiento) los árboles aceleran su crecimiento e inician la formación de ramas y engrosamiento del fuste siendo este último predominante en peso durante el resto de su vida, seguido por las ramas y de último las hojas. El comportamiento de la biomasa de ramas obedece a un modelo cuadrático con un aumento hasta la edad de 10 años y una merma después de dicha edad, probablemente causada por competencia intraespecífica por luz y espacio para crecer. Según Lugo *et al.* (1988) al estudiar el crecimiento y acumulación de biomasa en plantaciones de diferentes especies en el trópico, encontrando que existe un mayor incremento anual de la biomasa del tronco entre los 10 y 20 años en árboles de *T. grandis* y *P. patula*, y que este crecimiento está influenciado por la disponibilidad de agua.

En la **tercera etapa** (período etario entre los 14 y 19 años) ocurre una disminución de la biomasa de las hojas, pecíolos y ramas mostrando que los árboles alcanzaron la máxima asimilación de carbono, probablemente al efecto de competencia intra-específica, a una reducción del crecimiento causada por el ataque de *H. grandella* a estos componentes de la biomasa aérea y reducirse la competencia con otros árboles (Piotto *et al.* 2004; De la Rosa *et al.* 2011; Díaz *et al.* 2011). Otro factor que afecta la producción de hojas y ramas de esta especie es la densidad de la plantación. Foli *et al.* (2003) consideran que árboles con un DAP de 60 cm ocuparán alrededor de 90 m² para el óptimo desarrollo de la copa que tendrá un diámetro aproximado de 10 m y una densidad de siembra de 107 tallos por hectárea; este espacio de crecimiento afectará de una u otra forma la cantidad de hojas y ramas del árbol.

En muchas especies la llegada a la etapa madura está relacionada con la reducción de ramas y un balance en las reservas de energía que en muchos casos puede ser motivo de la alta eficacia en la lucha contra enfermedades (Punches 2004).

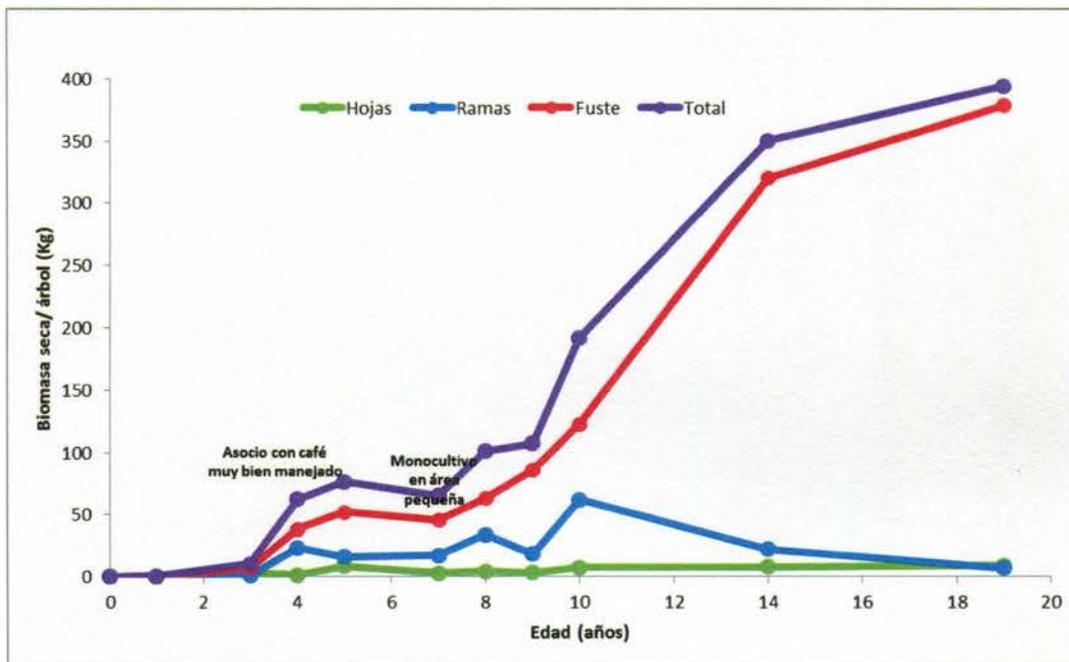


Figura 7. Biomasa seca de árboles de *C. odorata* de acuerdo su edad según sus principales componentes.

Según Delagrange *et al.* (2008) muchas de las variaciones en la biomasa del árbol pueden deberse a variables que afectan la acumulación de biomasa durante los tres primeros años de crecimientos, incluyendo a *C. odorata* especie en la que dicha variación en la biomasa está relacionada a corto plazo con la intercepción de luz y eficiencia de uso del N, mientras que a largo plazo esta eficiencia se relaciona más con la disponibilidad de agua en el suelo. Vitousek y Sanford (1984) y Yamada y Gholz (2002) estudiaron diferentes especies forestales en parcelas de productores en la Amazonía Brasileña y Jiménez (2012) en Honduras reportando comportamientos de crecimiento similares a los presentados (Figura 8), es decir un incremento acelerado de la biomasa a partir de los 9 años bajo condiciones de crecimiento adecuadas para los árboles de cedro, lo que podría indicar que los sitios de crecimiento en San Isidro del General son óptimos para el desarrollo de la especie.

En la Figura 8 se muestra el mejor modelo de ajuste para explicar la relación entre la biomasa seca producida en la parte aérea de acuerdo a la edad de los árboles; este modelo de ajuste como cualquier otro de su tipo es aplicable para los datos dentro del modelo los cuales van en un rango de edades de 1 a 19 años, por lo cual no es recomendable extrapolar.

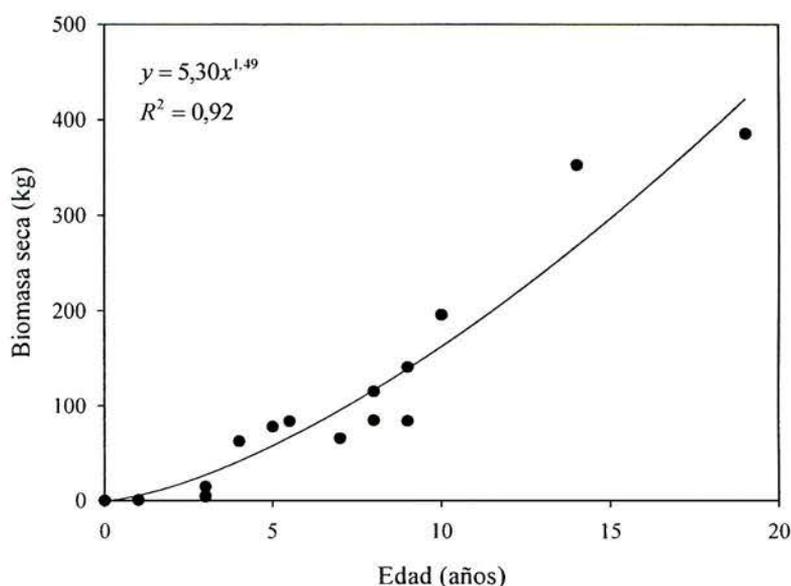


Figura 8. Modelo de regresión del total de biomasa aérea seca de árboles de *C. odorata* de acuerdo a la edad.

Modelos similares se confeccionaron para comparar las relaciones follaje vs edad y ramas vs edad (no presentados) sin embargo la correlación de estos modelos no fue estadísticamente significativa, posiblemente a la naturaleza propia del árbol ya que este es caducifolio, por lo que de acuerdo a las condiciones climáticas propias del sitio el árbol puede tener diferente cantidad de hojas en cierta época del año. Saint *et al.* (2005) expone que los modelos de biomasa pueden variar según la edad del rodal, no por la madurez del árbol, sino más bien por un efecto combinado entre la edad y su “condición social”, ya que en plantaciones o en bosques no se puede dejar de lado el efecto que tienen los demás individuos.

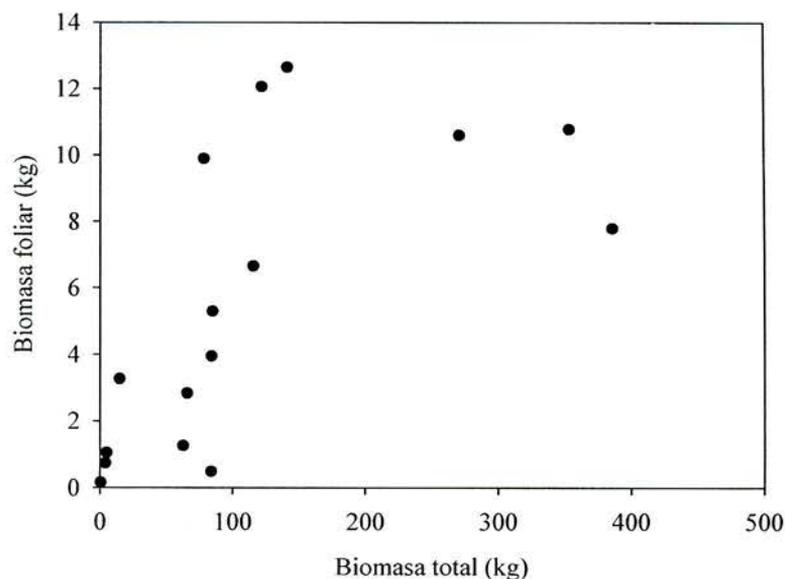


Figura 9. Relación entre la biomasa seca total y la biomasa seca foliar de árboles de *C. odorata*

Existe evidencia que relaciona de forma positiva el índice de área foliar o biomasa desarrollada por las hojas y el crecimiento de los árboles (Kozłowski y Pallardy 1997), lo cual se evidencia también en la Figura 9 en la que se compara estas dos variables del crecimiento de *C. odorata* notándose como tiende a aumentar la cantidad de biomasa total conforme la biomasa de las hojas crece, comportamiento que puede traer consigo una disminución en la tasa neta de asimilación ya que se puede aumentar el auto sombreado de las hojas que se encuentran en la parte baja de la copa (Kozłowski y Pallardy 1997). Sin embargo este fenómeno no puede verse de forma aislada y se debe contemplar que el árbol crece junto a otros individuos, ya sea de especies diferentes cuando se encuentra en el bosque o en policultivos o de la misma especie cuando está en plantaciones puras, factores que también limitan o potencian su desarrollo. En cuanto al análisis estadístico (Cuadro 4) se puede decir que ambos modelos son estadísticamente válidos, ya que estos cumplen con una probabilidad (p-valor) menor a 0,05.

Cuadro 4. Análisis estadístico para los modelos de biomasa de árboles de *C. odorata* de las Figuras 8 y 9

Figura	Modelo	R ²	Coeficiente		Error est.		p-valor	
			a	b	a	b	a	b
8	$y=ax^b$	0,92	5,30	1,49	2,07	0,15	0,022	<0,0001
9	$y=ax+b$	0,41	2,75	0,02	1,27	0,01	0,047	0,007

En comparación con las plantas anuales los árboles se encuentran en desventaja debido a que cada incremento en la biomasa seca total se destina a la producción de madera, la cual no es fotosintéticamente productiva (Kozlowski y Pallardy 1997), comportamiento que también es aplicable para la especie en estudio y se evidencia en el Cuadro 1, donde se puede observar que la relación entre hojas/tronco disminuye conforme aumenta la edad; resultados comparables con los encontrados con anterioridad para otras especies forestales (Switzer *et al.* 1968; Dickens *et al.* 2004; Portuguez 2012). El crecimiento de las especies arbóreas también se ve afectado cuando se plantan con otras especies, como demuestran Stanley y Montagnini (1999) al estudiar el crecimiento y producción de biomasa de cuatro especies creciendo en plantaciones puras y mixtas en la Estación Biológica La Selva, donde documentan que los árboles de *Hieronyma alchorneoides* y *Pithecellobium elegans* crecen entre 40 y 50% más rápido en plantaciones mixtas que en puras.

Una característica común en bosques o selvas tropicales, es la variabilidad en la tasa de crecimiento de las especies producto de factores como el suelo y competencia por espacio y luz (Murillo 2008); este hecho explica el por qué las diferencias de crecimiento en árboles maderables como *C. odorata* que en muchos casos se encuentran en asociados con cultivos agrícolas perennes, en pastizales o en plantaciones forestales mixtas.

En la Figura 10 se evidencia la variabilidad en el crecimiento de los árboles según el sitio y las condiciones en que se siembre notándose que, indiferentemente del sitio, el crecimiento muestra una tendencia a aumentar el DAP de acuerdo al paso de los años; sin embargo, de acuerdo al R² no es confiable utilizar estos modelos para la predicción de crecimiento del árbol ya que este valor es relativamente bajo en todos los casos.

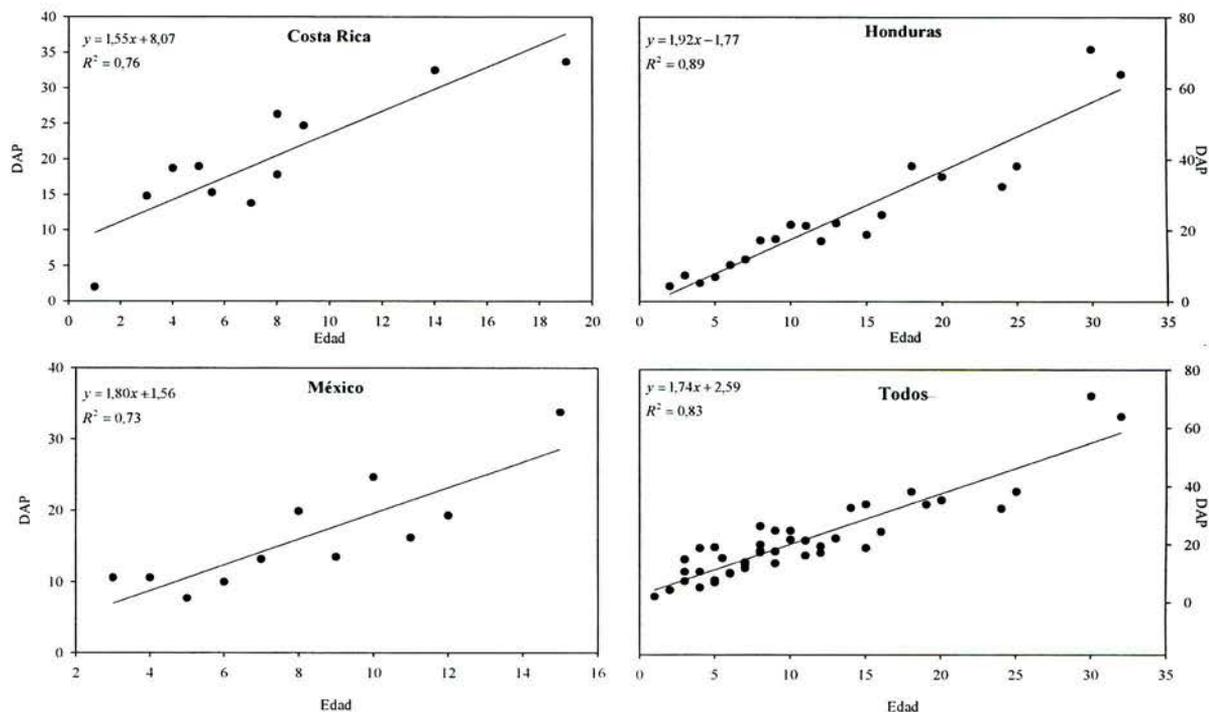


Figura 10. Modelo de regresión lineal con mediciones de diámetro altura de pecho (DAP), según la edad del árbol en diferentes sitios (datos tomados de Murillo 2008 y Jiménez 2012).

Estos resultados concuerdan con los de (Petit y Montagnini 2006) quienes coinciden que existe gran variabilidad en el crecimiento y la productividad comercial de los árboles de acuerdo al manejo (monocultivo o policultivo) que se le dé a estos. Además que se hace evidente las diferencias en ecología y clima de las diferentes zonas, lo cual afecta de forma positiva o negativa el crecimiento de los árboles. Aun así existe una relación evidente entre el DAP de acuerdo a la edad de árboles de *C. odorata* que variará de acuerdo al sitio y muestras tomadas.

1.3. Conclusiones

- En cuanto la acumulación de biomasa del árbol de *C. odorata* desde 1 a 19 años se pueden distinguir tres etapas de crecimiento, siendo la primera etapa lenta, la segunda etapa es la más influenciada por los factores ambientales y la tercera etapa caracterizada por un incremento rápido de la biomasa del componente leñoso.
- Con el aumento de la edad del árbol existe una tendencia a aumentar la cantidad de madera en comparación a la cantidad de follaje.
- El modelo de regresión: $y=5,30x^{1,49}$ (donde y representa la biomasa seca y x la edad del árbol) es aplicable ($R^2=92$) para conocer el valor de la biomasa de los árbol entre 1 y 19 años de edad.
- Existe relación entre el DAP y la edad del árbol y lo cual puede variar dependiendo del sitio, condiciones ambientales en que se desarrollen los individuos y individuos muestreados.

Capítulo 3

1. Concentración de nutrimentos en los componentes de la biomasa aérea

1.1. Introducción

La cantidad de nutrimentos asociada a los componentes de la biomasa aérea de cada especie forestal depende de su genotipo, edad, el sitio donde se encuentre, la época del año y del órgano en que se tome la muestra, en el tanto en que estos factores afectan los procesos fisiológicos de los árboles. De forma general se puede decir que dependiendo del ecosistema donde se encuentre y el clima que esté presente, la cantidad total de nutrimentos del árbol variará y seguirá en el orden: árboles tropicales > árboles boreales > árboles de hoja ancha de clima templado > coníferas de clima templado (Marion 1979) o tropical.

El balance de nutrimentos en bosques o plantaciones tropicales es mucho más frágil, si se compara con el de bosques templados. La pérdida de nutrimentos en zonas tropicales va desde situaciones poco significativas como la caída de un árbol, hasta pérdidas totales de la capa fértil del suelo cuando ocurre un deslizamiento. Si bien la perturbación humana se encuentra en el medio de estos dos extremos, no se puede dejar de tomar en cuenta la pérdida de nutrimentos que esto causa.

Suministrar a las plantas nutrimentos minerales de forma correcta es esencial para su desarrollo óptimo, aunque en muchas plantaciones o bosques este suministro lo ofrece de manera suficiente el suelo; bajo estas condiciones si se presentan deficiencias nutricionales, estas no suelen ser catastróficas, ni muy obvias. Además de los elementos esenciales en los árboles suele encontrarse elementos como el platino, estaño, plata y otros que estos no son esenciales (Parker 1956) y a veces hasta tóxicos.

Durante sus primeros meses, los arbolitos en almácigo toman la mayoría de los nutrimentos del suelo o de la semilla cuando esta tiene muchas reservas, después de esta

etapa la cantidad de nutrimentos en cada uno de las partes del árbol se deben a una redistribución interna y a otros factores como la adición de nutrimentos por la lluvia, fijación biológica de N, los provenientes de la meteorización de las rocas y los nutrimentos liberados por la hojarasca y las raíces (Attiwill 1995).

1.2. Resultados y discusión

La variación de la concentración de macronutrimentos en el follaje y el fuste de *C. odorata* puede notarse para cada uno de estos componentes de donde se nota que (Figura 11):

1. Ni en el follaje ni en el fuste, la concentración sigue algún modelo específico que la relacione con el aumento de la edad del árbol.
2. La concentración de todos los macronutrimentos es mayor en el follaje que en el fuste del árbol.
3. El N es el nutrimento que se encuentra en mayor concentración en cada uno de los componentes estudiados.
4. El rango de variación de la concentración del follaje de todos los macronutrimentos es más amplio que el encontrado en el fuste.
5. No se encontró ninguna relación entre las concentraciones de cada elemento entre el follaje y el fuste.

Una mayor concentración de nutrimentos en las hojas que en el fuste se ha reportado para especies como *A. acuminata* (Segura *et al.* 2005), *T. grandis* (Murillo 2014), *G. arborea* (Avellán 2012) y *T. amazonia* (Fernández *et al.* 2013) en Costa Rica y coinciden con lo expuesto por Ralston y Prince (1965) para *P. taeda*, *Quercus* spp. y *Carya* spp. al encontrar que la concentración de N y P en hojas es mayor que en el tronco y las ramas.

En varias especies tropicales las ramas y el follaje tiene alrededor del 25-30% de la biomasa total del árbol, pero estos componentes representan cerca del 50% del total de los

nutrimentos en la biomasa aérea del árbol (Stanley y Montagnini 1999) lo que evidencia la importancia de estos elementos para el buen desarrollo de estos componentes y el óptimo crecimiento del árbol. Sin embargo debe mencionarse que estas relaciones pueden cambiar en plantaciones forestales debido al manejo que se le da a los árboles y que altera su producción de biomasa, principalmente a edades o momentos en que se realizan podas de ramas o raleos en la plantación.

El N es el nutrimento que se encuentra en mayor concentración tanto en las hojas como en el fuste del árbol de *C. odorata*, durante los primeros 19 años de crecimiento debido a que este elemento se encuentra más concentrado en células fisiológicamente activas, como hojas y tejidos meristemáticos (Kozłowski y Pallardy 1997). Su concentración oscila entre 2,14 y 3,33 % variando de acuerdo a la edad, la época del año, etapa de crecimiento y el tejido. En el fuste los valores de la concentración de N oscilan entre 0,90 y 0,32 % y son los más bajos en la biomasa aérea debido a que en este componente no cumple una función fisiológica y probablemente quede atrapado a la hora de la formación de la madera.

La concentración de macronutrimentos en las hojas muestra una menor homogeneidad en comparación con la concentración en el fuste conforme aumenta la edad del árbol; esto debido a la gran actividad metabólica que se lleva a cabo en las hojas, a diferencia del tronco, donde la mayoría de los nutrimentos cumplen una función estructural (Kozłowski y Pallardy 1997). En el trópico este comportamiento puede variar según el régimen de lluvias del sitio, como lo demuestran Santiago *et al.* (2004) al estudiar la disminución en el contenido de N en las hojas conforme disminuye la precipitación anual en bosques de Panamá.

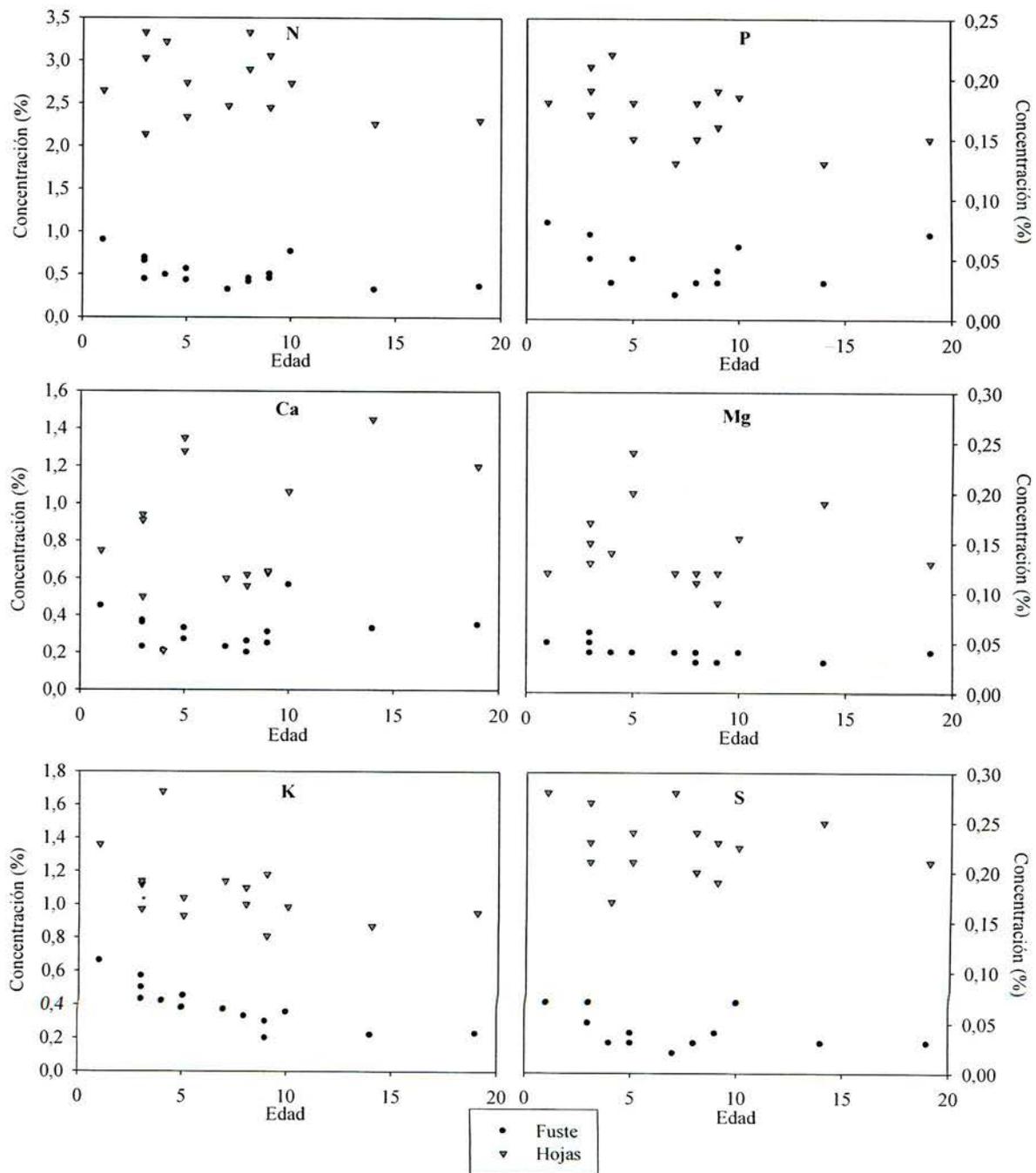


Figura 11. Concentración de diferentes macronutrientes en el fuste y las hojas de árboles de *C. odorata* de acuerdo a su edad.

Considerando únicamente la variación de la concentración por tipo de componente de la biomasa aérea de los árboles se puede observar que (Figura 12):

1. Todos los elementos se encuentran en mayor cantidad en las hojas, excepto el K, que se concentra más en los pecíolos de *C. odorata*. Con esa única excepción la concentración de los elementos disminuye en el orden: Follajes > Pecíolos > Ramas primarias = Ramas secundarias > Fuste.
2. Las diferencias de concentración encontradas para N, P, K, Ca, Mg y S entre las ramas primarias y secundarias son tan pocas que no merece separarlas para su análisis en estudios futuros.
3. Indiferentemente del componente analizado la concentración de N oscila entre 2,73-0,51%, la de K entre 1,46-0,38%, la de Ca entre 0,85-0,31%, la de P entre 0,17-0,04%, la de Mg entre 0,14-0,04% y la de S entre 0,23-0,04%.
4. Si bien la concentración varía durante toda la edad estudiada del árbol estos cambios son muy pequeños, lo cual permite que las barras de error de los promedios sean relativamente pequeñas y permitan la existencia de diferencias significativas.

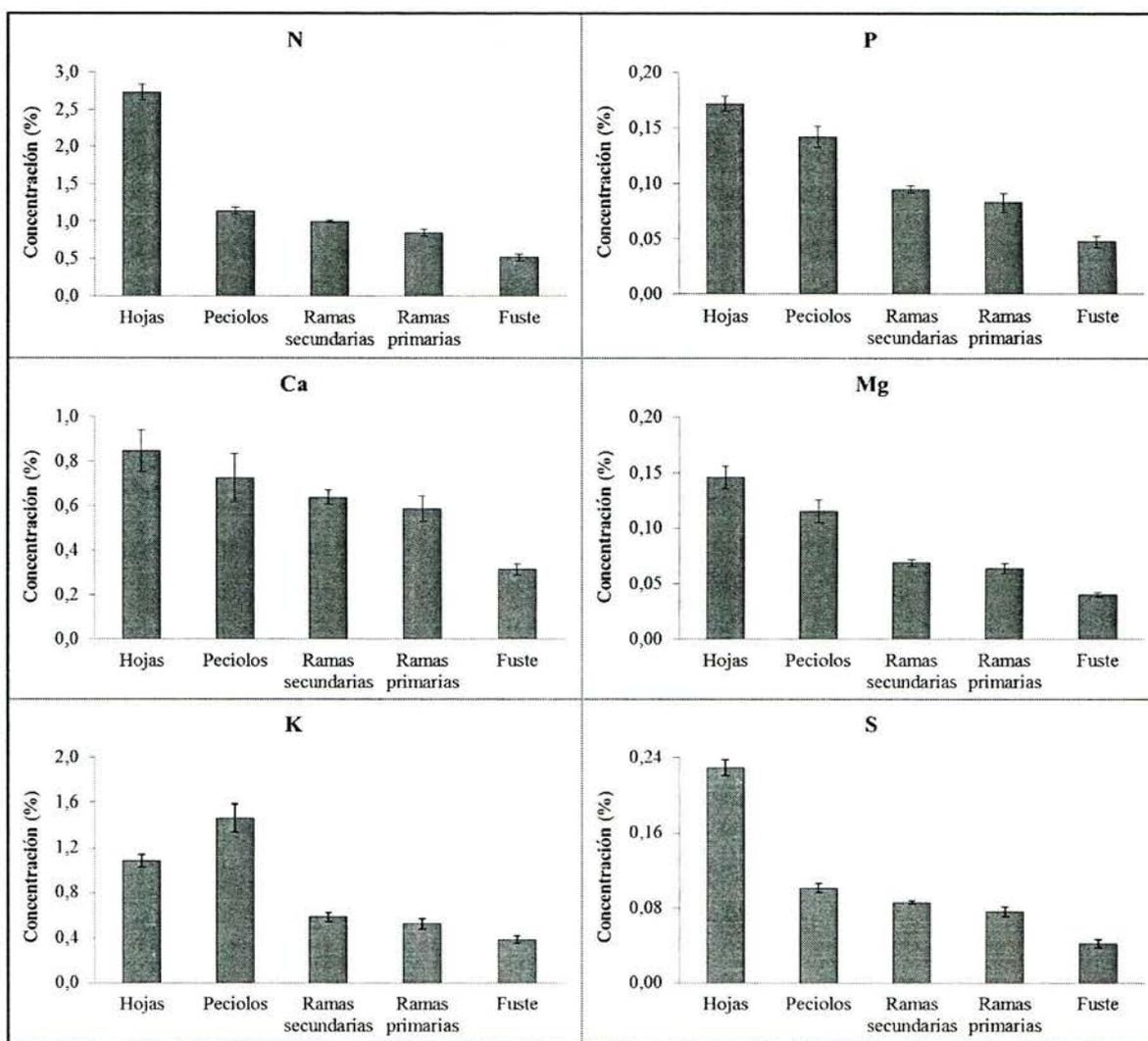


Figura 12. Promedio de la concentración de macronutrientos en árboles de *C. odorata* para edades de 1 a 19 años. Las barras verticales corresponden al error estándar.

Como se mencionó anteriormente, existe una tendencia en la concentración de nutrientes en cada componente de acuerdo a la morfología del árbol, existiendo un efecto de dilución principalmente desde las hojas hacia el tronco del árbol, comportamiento que se puede explicar debido a que las células que crecen poseen una mayor concentración de nutrientes en comparación a las células que no lo hacen y cumplen una función estructural (Salisbury y Ross 1992), además para la mayoría de especies en las hojas se

encuentran la mayor concentración de muchos de los nutrimentos debido a todas las reacciones y trabajo metabólico que ahí se da.

La menor concentración de nutrimentos ocurre en el fuste en cuyo componente el N es el elemento más concentrado. Si bien la concentración varía durante toda la edad estudiada del árbol estos cambios son muy pequeños, lo cual permite que las barras de error de los promedios sean relativamente pequeñas.

Las altas concentraciones de K en los pecíolos del árbol se pueden atribuir a la naturaleza del nutrimento y a sus funciones básicas dentro de los árboles ya que éste no tiene un rol estructural y por el contrario se mueve por todo el árbol. Este resultado, que concuerdan con el estudio de Niinemets (1999) al estudiar las diferencias químicas entre la lámina foliar y los pecíolos de *Fraxinus excelsior* encontrando que los pecíolos poseen alrededor de 20% más de compuestos no estructurales que las hojas. Estudios más detallados por medio de análisis de diferentes tejidos con PCR detectaron que dos de los transportadores de K⁺ (PTORK y PTK2) se encontraban en mayores cantidades en los pecíolos y el floema de los árboles (Fromm 2010).

El Ca es uno de los elementos más importantes en la formación de la madera y a nivel celular este elemento tiene funciones como mensajero en diferentes procesos fisiológicos, en las membranas de las paredes celulares de los troncos donde tiene un papel fundamental no solo en la estabilidad sino también en la integridad estructural de la célula (Lautner y Fromm 2010). Deficiencias de Ca en la madera del tronco pueden traer consigo cambios en sus propiedades mecánicas tales como una disminución de la resistencia a la ruptura y la elasticidad, además de traer consigo una disminución en la proporción de lignina (Wimmer y Lucas 1997). Wessmann *et al* (1989) concluyen que la concentración de Ca en árboles deficientes en el elemento puede ser menor en la corona, ya que este se debe transportar a largas distancias y existe una alta competencia en el flujo del xilema. Los problemas mencionados en la literatura no se presentan en este trabajo, muy posiblemente debido a

que los árboles no presentaban deficiencia de Ca, lo cual permite una mejor translocación y transporte.

El Mg es parte importante de la molécula de clorofila (Marschner 2002) y su deficiencia produce clorosis en la lámina foliar (Malavolta 1980). Estudios llevados a cabo por Ericsson y Kähr (1995) en plántulas de abedul (*Betula pendula*) creciendo en medio hidropónico en donde se restringió entre 10% al 80% el Mg requerido para crecer en condiciones óptimas bajo las condiciones del ensayo, se obtuvieron síntomas de deficiencias del elemento cuya severidad correlacionó con la cantidad de Mg aplicado. Además la biomasa de la raíz en comparación con la biomasa total, decreció 22% en el testigo y un 8% en las plantas con la menor cantidad de Mg, en este mismo tratamiento también disminuyó el área fotosintéticamente activa.

Para la concentración de la mayoría de los micronutrientes en árboles de 1 a 19 años (Figura 13) no se cumple una tendencia de acuerdo a los componentes del árbol, a excepción de Mn y el B que se comportan al igual que los macronutrientes existiendo una disminución de su concentración desde las hojas al tronco, la variación de la concentración de Zn en los diferentes componentes es bastante baja y permanece en alrededor de 30 ppm.

De esta manera y en forma generalizada se puede mencionar (Figura 15) que:

1. El Fe y el Al tienen una forma de acumulación de nutrientes similar siendo que sus mayores concentraciones ocurren en el orden: ramas secundarias > ramas primarias > fuste > hojas = pecíolos.
2. El Mn y el B tienen una forma de acumulación de nutrientes similar siendo que sus mayores concentraciones ocurren en el orden: hojas > pecíolos > ramas secundarias = ramas primarias > fuste.
3. El Cu pecíolos > hojas > ramas secundarias = ramas primarias > fuste
4. El Zn concentraciones similares en todos los componentes de la biomasa aérea

5. La concentración de Al es la que varía más durante las edades estudiadas, principalmente en las ramas primarias y secundarias, sitios donde se encuentran la mayor cantidad del elemento.

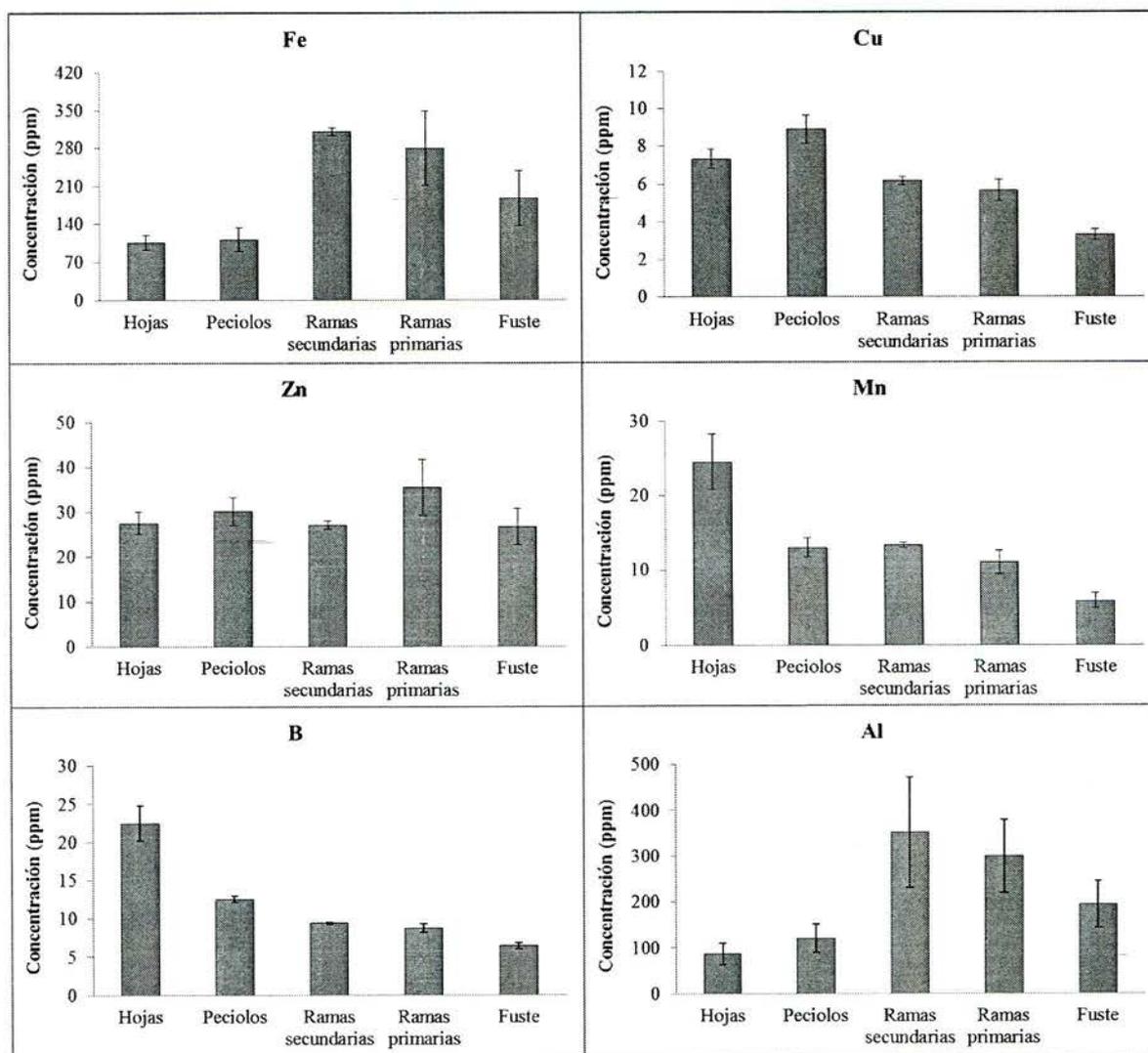


Figura 13. Promedio de la concentración de micronutrientes en árboles de *C. odorata* para edades de 1 a 19 años. Las barras verticales corresponden al error estándar.

La concentración de nutrientes en árboles de *C. odorata* con edad de entre 1 a 19 años en la mayoría de casos no posee un comportamiento (Cuadro 5) pues los modelos no son estadísticamente diferentes y los R^2 son muy bajos. Para el caso de la concentración de macronutrientes en cada componente del árbol, se presenta una relación con la edad en el fuste el N, K y Mg, en las hojas el K y P, y en los pecíolos el P, donde los dos coeficientes de las ecuaciones son estadísticamente válidos.

Varios estudios concuerdan con la heterogeneidad que presenta la concentración de nutrientes en las plantaciones forestales y en los bosques. Sardans *et al.* (2011) con una base de datos con un total de 3530 muestras tomadas en Cataluña, España determinaron la variabilidad de la concentración foliar de distintas especies, teniendo como resultados que no solo la temperatura media y la precipitación influyen en la concentración de nutrientes, si no también factores edáficos, filogenéticos y antropogénicos como la contaminación. Además encontraron diferencias significativas en las concentraciones foliares de las especies según su hábito de crecimiento, teniendo una mayor concentración de N, P, K, S, Ca y Mg especies deciduas, seguidas por especies de hojas perennes y por último las coníferas con las concentraciones menores de estos nutrientes. En bosques tropicales la topografía del terreno, la vegetación circundante y las interacciones de los nutrientes en el suelo son factores importantes a tomar en cuenta, ya que pueden variar la concentración foliar de nutrientes en los árboles de una misma especie (Wu *et al.* 2007).

Según los modelos de regresión lineal estadísticamente válidos encontrados en el presente trabajo la concentración de N, P y K en varios tejidos tiende a disminuir al aumentar la edad (Figura 14), siendo este comportamiento más evidente en el K del fuste. Además se puede observar que la concentración de P y K en las hojas, es mayor que en la de los otros componentes del árbol. Fernández *et al.* (2013) consideran que la concentración de N en diferentes componentes de los árboles puede disminuir por tres razones: 1) el efecto de dilución que se da al aumentar la biomasa de acuerdo a la edad del árbol por lo que tiende a producir tejidos estructurales; 2) la disminución de los

requerimientos del árbol con la edad por lo que se necesitará menos N para mantener las tasas de crecimiento y 3) puede ocurrir una disminución en la cantidad de N disponible en el suelo lo que afectaría la absorción del nutrimento.

Cuadro 5. Regresión lineal entre la concentración de cada elemento en los tejidos de árboles de *C. odorata* y la edad (1-19 años). Los modelos de regresión son de la siguiente forma: $C_n = \beta_1(\text{Edad}) + \beta_0$. Se destacan los modelos validos estadísticamente según $p < 0,05$.

Tejido	Nutrimento (%)	Coeficientes		R ²	Error estándar		p-valor	
		β_1	β_0		β_1	β_0	β_1	β_0
Fuste	N	-0,020	0,65	0,28	0,010	0,070	0,040	<0,0001
	K	-0,220	0,54	0,68	0,004	0,040	0,001	<0,0001
	Ca	0,002	0,30	0,01	0,010	0,050	0,790	<0,0001
	Mg	-0,001	0,05	0,29	0,001	0,004	0,040	<0,0001
	P	-0,001	0,05	0,04	0,001	0,010	0,490	0,0001
	S	-0,001	0,05	0,17	0,001	0,010	0,120	<0,0001
Hojas	N	0,029	2,93	0,11	0,200	0,190	0,210	<0,0001
	K	-0,020	1,24	0,23	0,010	0,090	0,070	<0,0001
	Ca	0,030	0,64	0,14	0,020	0,170	0,150	0,0021
	Mg	-0,001	0,15	0,01	0,002	0,020	0,730	<0,0001
	P	-0,003	0,19	0,26	0,001	0,010	0,050	<0,0001
	S	-0,001	0,24	0,03	0,002	0,020	0,510	<0,0001
Pecíolos	N	-0,010	1,23	0,13	0,010	0,080	0,180	<0,0001
	K	-0,030	1,68	0,09	0,030	0,230	0,290	<0,0001
	Ca	0,010	0,65	0,02	0,020	0,210	0,650	0,0086
	Mg	0,001	0,11	0,02	0,002	0,020	0,660	0,0001
	P	-0,004	0,17	0,28	0,002	0,020	0,040	<0,0001
	S	0,001	0,10	0,03	0,001	0,010	0,500	<0,0001
Ramas	N	0,010	0,08	0,02	0,010	0,100	0,630	<0,0001
	K	-0,010	0,64	0,19	0,010	0,080	0,130	<0,0001
	Ca	0,004	0,55	0,01	0,010	0,120	0,750	0,0008
	Mg	0,000	0,06	0,01	0,001	0,010	0,900	0,0001
	P	0,004	0,05	0,18	0,002	0,020	0,150	0,0271
	S	0,001	0,07	0,08	0,001	0,010	0,360	<0,0001

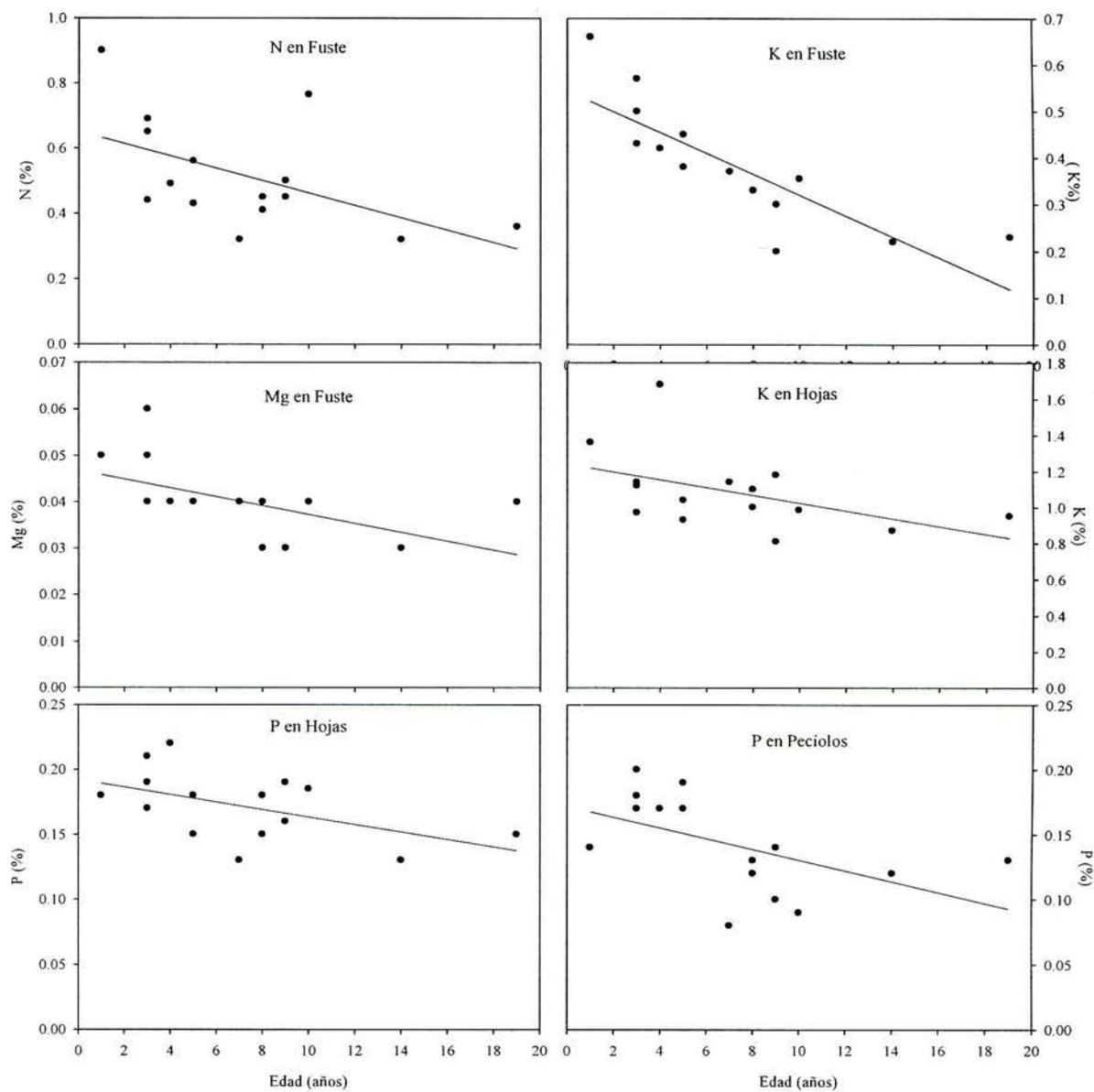


Figura 14. Modelos de regresión lineal para la concentración de nutrientes según la edad de árboles de *C. odorata*. Los modelos presentados son validos estadísticamente según el Cuadro 5.

Según los resultados expuestos por Webb *et al.* (2000) las concentraciones intermedias de P en las hojas para árboles de *C. odorata* son alrededor de 0,23%, mientras que una concentración de 0,10% es considerada baja, por lo que según lo mostrado en la Figura 16 la concentración de P en las hojas se considera entre intermedia durante los primeros años del árbol y cae según aumenta la edad, sin embargo no llega a tener una deficiencia de P (0,10%).

Los contenidos de K en el fuste decaen más rápidamente en comparación al K de las hojas, posiblemente por la gran movilidad del elemento y su función en la apertura de estomas, asimilación de CO₂ y regulación de la tasa de transpiración (Binkley *et al.* 2002, citado por Fernández *et al.* 2013) por lo que evidente una mayor concentración en las hojas que en el tronco conforme el árbol crece.

Para los diferentes componentes del árbol existe una relación creciente entre la concentración de N/P y N/S (Figura 15) y además se puede notar la diferencia de una mayor concentración de estos nutrientes en las hojas, con respecto al resto del árbol.

La relación foliar de N/P en especies forestales tiende a disminuir de acuerdo a la latitud, siendo esta relación mayor en bosques tropicales en comparación con bosques templados, lo que se atribuye a que en suelos tropicales generalmente existe una mayor disponibilidad de N pero una baja cantidad de P (Hedin 2004), posiblemente por la mayor actividad microbiana en estos suelos y la importancia que estos tienen para en ciclo del N. Por otro lado Flückiger y Braun (2003) hacen una revisión de diferentes estudios y concluyen que el rango adecuado para la relación N/P es de 10,1-17,1, lo cual coincide con los rangos de obtenidos para las hojas de *C. odorata*.

En la península de Osa en Costa Rica se han llevado a cabo estudios con diferentes especies forestales, en donde se ha encontrado una variación del 25% en la relación N/P foliar de acuerdo a la época en que se tomen los muestreos siendo mayor en la época seca;

sin embargo el mismo estudio muestra que no hay relación en el régimen de lluvia de los sitios y esta relación y que tampoco depende de la disponibilidad de P en el suelo, (Townsend et al. 2007) lo que pone en evidencia la riqueza y heterogeneidad de los bosques tropicales.

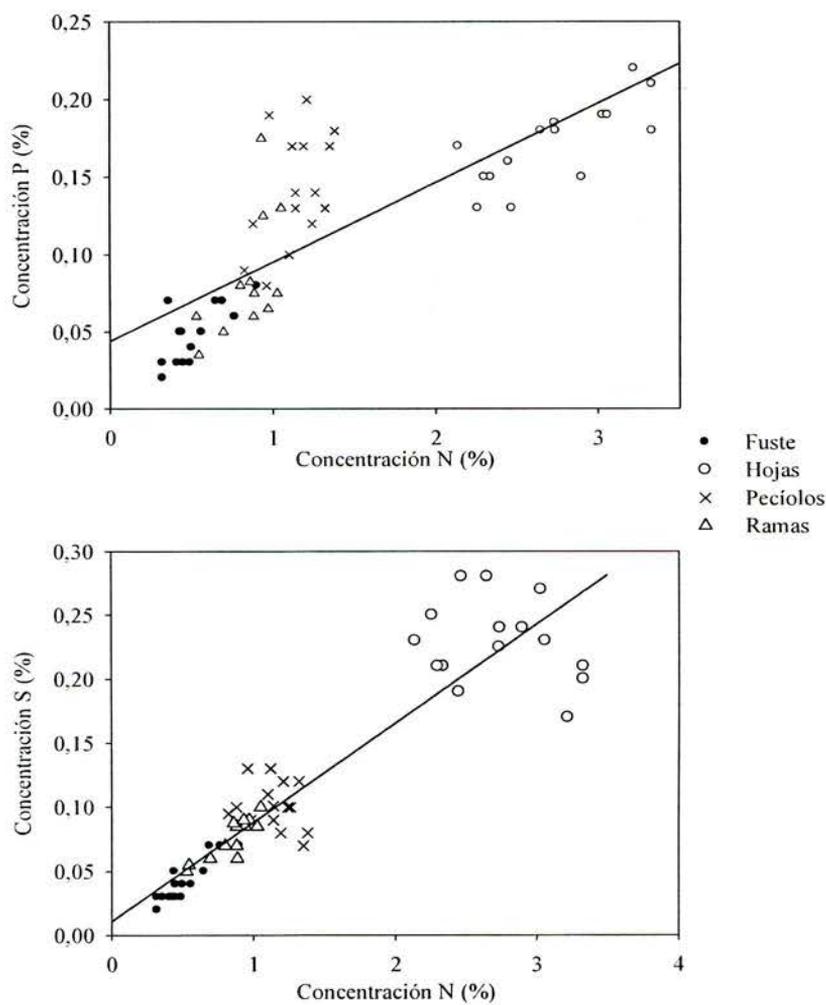


Figura 15. Modelo de regresión lineal para la concentración de N vs P y N vs S, según los componentes de árboles de *C. odorata* entre 1-19 años de edad.

1.3. Conclusiones

- Las hojas tienen una mayor concentración de macronutrientes en comparación con el resto de componentes del árbol.
- No existe una diferencia estadística en la concentración del mismo macro y micronutriente entre las ramas primarias y las ramas secundarias.
- Existe un efecto de dilución desde las hojas hasta el tronco del árbol en la concentración de N, P, Ca, Mg, K, S, Mn, y B.
- El modelo de regresión lineal que compara la edad con la concentración de nutrientes del árbol es válido estadísticamente para: N, K y Mg en el fuste; para K y P en hojas y para P en los pecíolos.
- Los modelos de regresión presentados y estadísticamente válidos, muestran una disminución de la concentración de los nutrientes desde 1 hasta 19 años de edad, sin embargo el valor de R^2 es bastante bajo, por lo que no se recomienda su uso para predicción.
- Existe una relación entre la concentración de N/P y N/S en diferentes componentes del árbol de *C. odorata*.

Capítulo 4

1. Acumulación de nutrimentos en la biomasa aérea

1.1. Introducción

En especies vegetales el estudio de la acumulación de nutrimentos es una de las herramientas más importantes con la que se cuenta para diagnosticar su estado nutricional. Conocer la cantidad aproximada de nutrimentos que requiere cierta especie durante su crecimiento es fundamental para un manejo adecuado de la plantación conducente al uso eficiente de fertilizantes y una reducción en los costos de producción y posible contaminación ambiental.

La acumulación de nutrimentos está relacionada con la biomasa de cada uno de los componentes del árbol, por lo que se puede ver afectada de acuerdo al manejo que se le dé a una especie en particular, de ahí la importancia de hacer los estudios durante el tiempo necesario hasta la cosecha de cada especie y en el caso de *C. odorata* existe poca información sobre los requerimientos nutricionales de la especie y el manejo de la nutrición que se le debe dar a las plantaciones durante su crecimiento, de ahí surge la preocupación por el desarrollo de este capítulo.

1.2. Resultados y discusión

A continuación se presentan los resultados de acumulación de nutrimentos en árboles de *C. odorata* de edad creciente, primero de los nutrimentos que la especie acumula en mayor cantidad y luego la de los conocidos como micronutrimentos.

La acumulación de N en árboles de *C. odorata* con edad de entre 1 y 19 años (Figura 16) tiene una tendencia exponencial, a excepción de las ramas cuyo modelos de regresión no es estadísticamente válido (Cuadro 4). El N es el nutrimento que más se acumula en los tejidos del árbol, principalmente en el fuste, debido a la cantidad de biomasa que posee este

componente. Según el modelo de regresión la acumulación llega a ser de alrededor de 2 kg en árboles que tienen 19 años de edad.

La absorción, transporte y uso dentro del árbol de diferentes compuestos nitrogenados específicos dependerá de la cantidad de N disponible en el ecosistema, los sistemas absorción, la cantidad de transportadores y metabolismo endógeno que permita la utilización de estos compuestos (Oehlund y Naesholm 2001). La cantidad de N en los tejidos de especies forestales puede variar por muchos factores, entre los cuales el suelo es uno de los más importantes, y dentro de éste actúan aspectos como la descomposición de la materia orgánica y en el caso de especies deciduas las diferencias entre la eficiencia de la descomposición de material y la mineralización del N, la fijación biológica de N y los factores ambientales como las adiciones por lluvia, la inmovilización del N en la biomasa microbiana y su liberación posterior (Constantinides y Fowne 1994); otros factores de desarrollo del árbol tales como la fructificación, floración, crecimiento y senescencia de hojas y raíces también determinan los requerimientos de N (Rennenberg et al. 2010).

Dinkelmeyer et al. (2003) llevó a cabo un estudio en la Amazonía, en el que fertilizó con N^{15} diferentes especies de árboles sembrados como policultivo, teniendo como resultados que para algunas especies no es necesario la fertilización nitrogenada directamente, ya que pueden tomar el nutrimentos de la cercanía de otras especies, siempre y cuando se cultiven en sistemas mixtos con árboles que tengan periodos de descanso o baja absorción de N, lo que reduciría la lixiviación de este elemento y la competencia entre árboles.

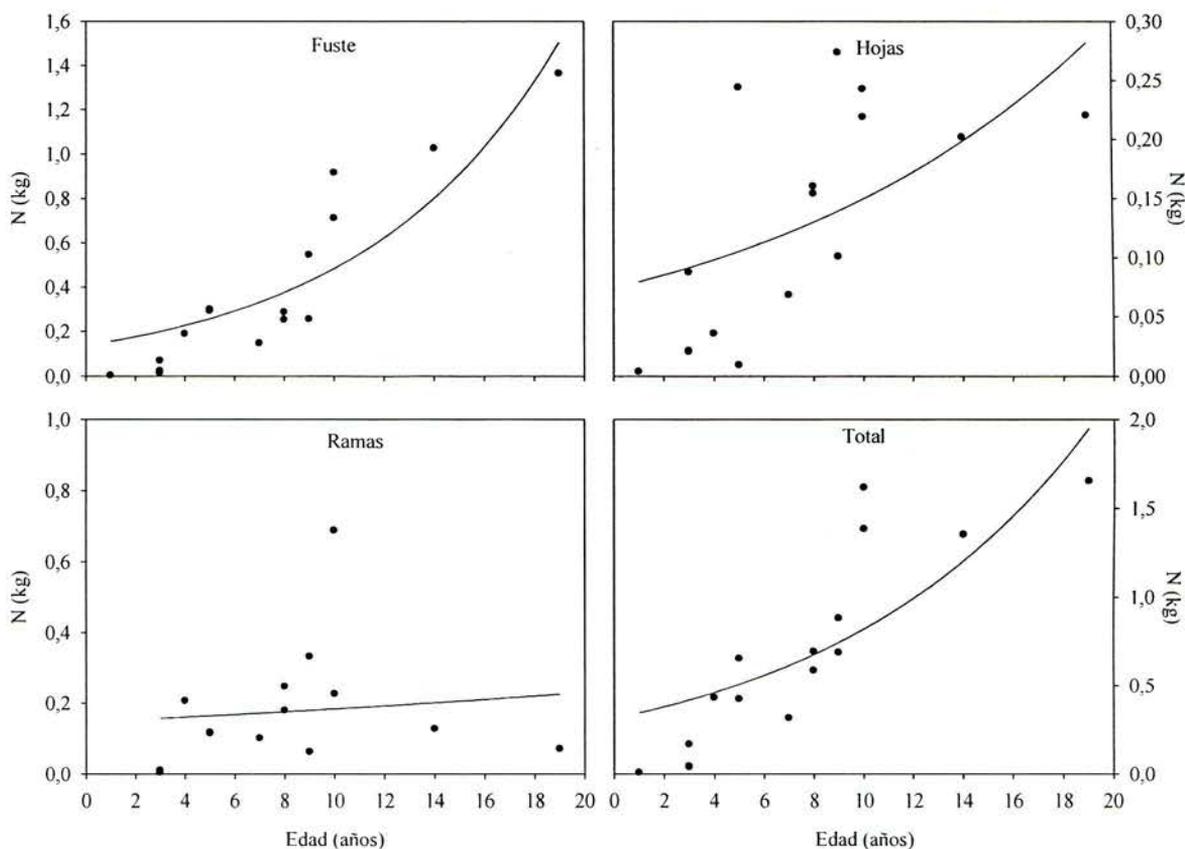


Figura 16. Modelos de regresión para la acumulación de N de acuerdo a la edad, en distintos componentes de árboles de *C. odorata*. Los modelos siguen la ecuación $y=a*b^{(edad)}$

En especies deciduas mucho de los nutrientes absorbidos pueden reciclarse a través de la hojarasca y por ende su cantidad depende del reciclaje de cada especie. Hiremath et al. (2002) estudiaron el uso y acumulación de nutrientes de especies de crecimiento rápido en bosques tropicales, encontrando que los árboles de *C. odorata* pueden reciclar alrededor de dos tercios del N absorbido y alrededor de un cuarto de lo tomado P absorbido. Por otro lado Millard (1995) afirma que muchas de las especies deciduas usan sus raíces como órgano de almacenamiento.

La acumulación de Ca y P en árboles de *C. odorata* de 1 a 19 años tiene una tendencia exponencial (Figuras 17 y 18) donde el fuste ocupa la mayor parte del Ca y P absorbido y

en las ramas el modelo que representa su absorción es estadísticamente válido. El Ca es uno de los elementos más importantes en la formación de la madera, a nivel celular este elemento tiene funciones como mensajero en diferentes procesos fisiológicos, en las membranas de paredes celulares de los troncos de los árboles el Ca tiene un papel fundamental en su estabilidad y en la integridad estructural de la célula (Lautner y Fromm 2010).

La deficiencia de Ca en la madera del tronco puede traer consigo cambios en las propiedades mecánicas de esta, tales como disminución de la resistencia la ruptura y la elasticidad y una disminución en la proporción de lignina (Wimmer y Lucas 1997), lo que afecta negativamente el precio final de venta de la madera. Wessmann et al. (1989) concluyen que las concentraciones de Ca en árboles deficientes en el elemento pueden ser menores en la corona ya que este se debe transportar a largas distancias y existe una alta competencia en el flujo del xilema, sin embargo en el presente caso este comportamiento no ocurre posiblemente debido a que los árboles no presentaban deficiencia de Ca, lo cual permite una mejor la translocación y transporte óptimos.

La absorción de P del suelo ocurre principalmente en los primeros 10 cm del mismo donde la concentración de raíces finas es más profusa y el elemento más abundante debido a una mayor actividad de enzimas fosfatasas que libera (Imai et al. 2012).

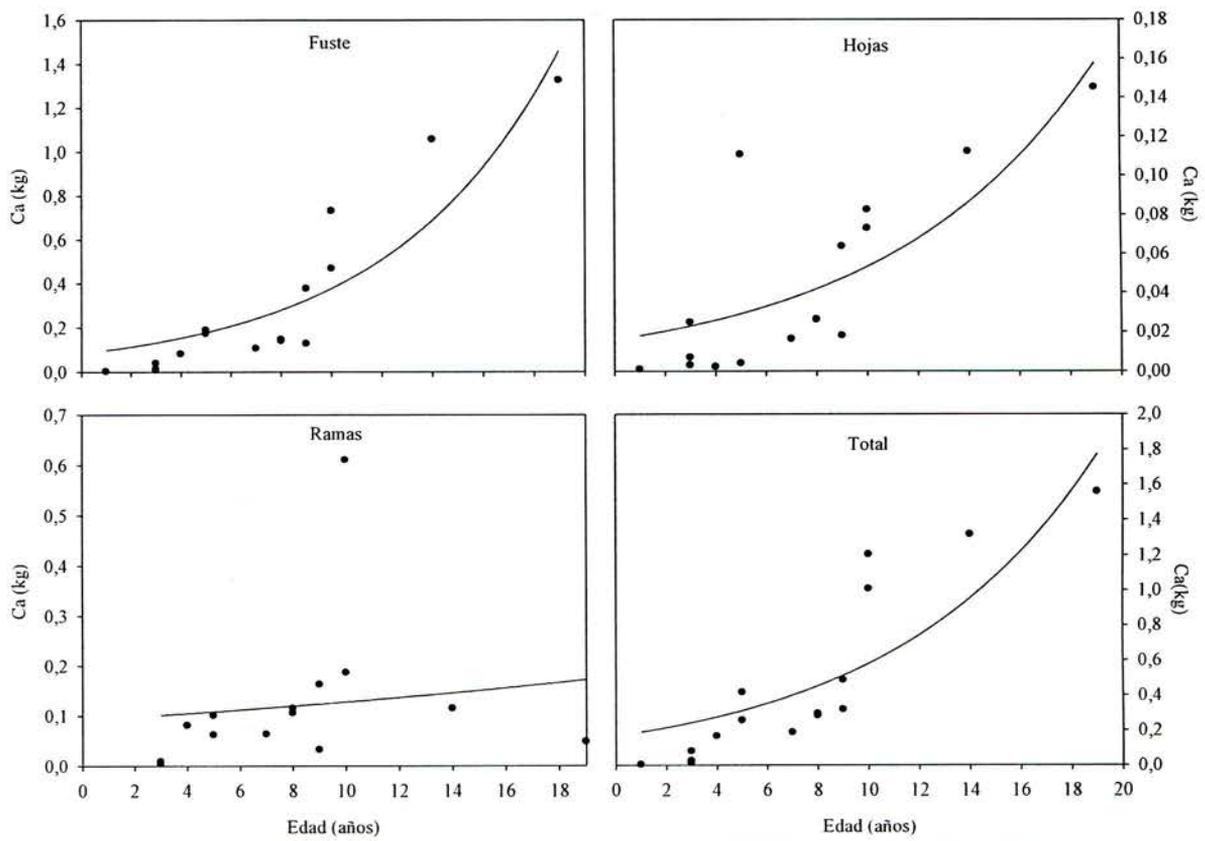


Figura 17. Modelos de regresión para la absorción de Ca de acuerdo a la edad, en distintos componentes de árboles de *C. odorata*. Los modelos siguen la ecuación $y = a * b^{(edad)}$

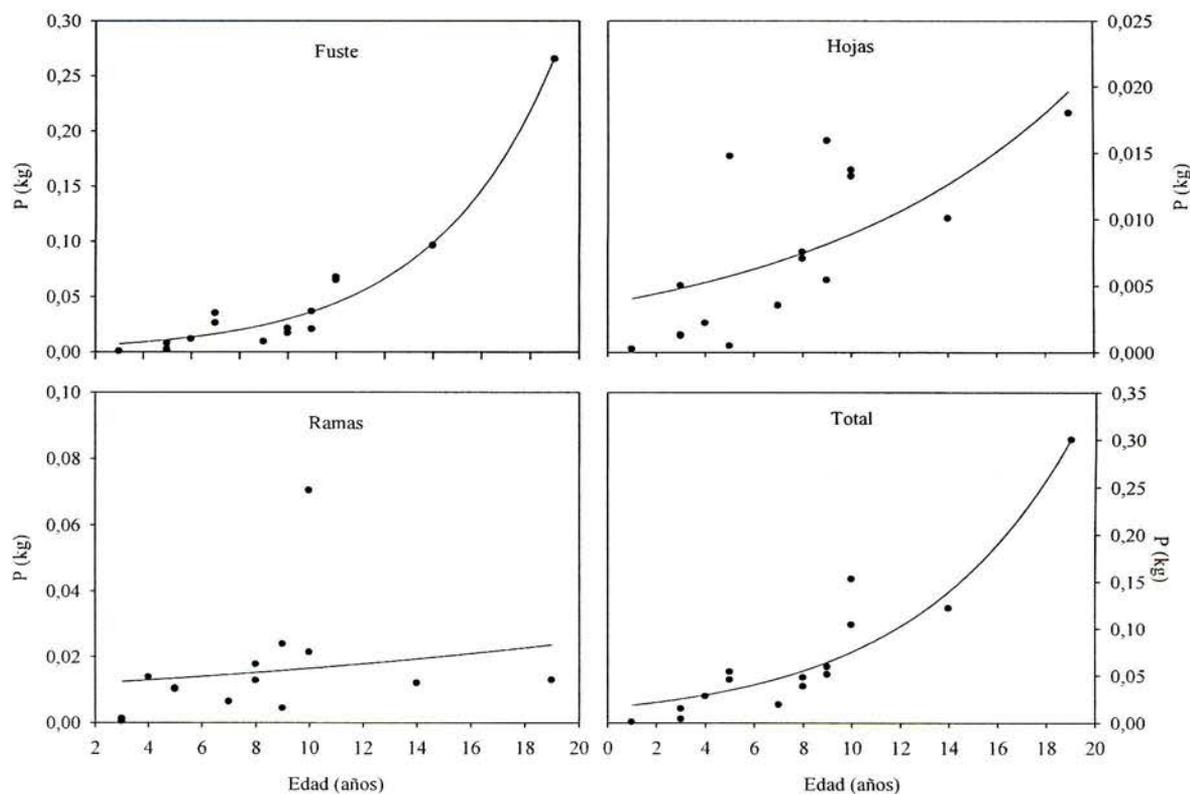


Figura 18. Modelos de regresión para la absorción de P de acuerdo a la edad, en distintos componentes de árboles de *C. odorata*. Los modelos siguen la ecuación $y=a*b^{(edad)}$

En el Cuadro 6 se detallan los modelos de acumulación de nutrientes para árboles de *C. odorata* con edad de 1 a 19 años y los parámetros estadísticos que indican su validez o rechazo. Es evidente que los nutrientes se acumulan mayormente en el fuste del árbol debido a su biomasa, además en cuanto a los modelos presentados la acumulación en las ramas no presenta un comportamiento estadísticamente válido para ninguno de los macroelementos, probablemente debido a que esta especie es fuertemente atacada por *Hypsipyla grandella* causando que el crecimiento de ramas y fuste no sea el normal de otras especies sino con “valles” de crecimiento en algunos momentos de su desarrollo. Otra alternativa sería que en asocio con cultivos se den podas fuertes o raleos para favorecer al

cultivo principal. El peso de los nutrientes acumulados en las ramas tiende a ser bajo en sus tejidos conductores cuando se translocan los elementos al fuste, por lo que tampoco son relevantes para el cálculo del total acumulado de P en el árbol. En cuanto al total acumulado, si se evalúa el modelo presentado a los 19 años de edad del árbol, se encuentra que los contenidos por elemento siguen en orden descendente un comportamiento $N > Ca > K > P > Mg > S$.

Los resultados de estos modelos concuerdan con los de Laclau *et al.* (2000) quienes realizaron modelos de biomasa y acumulación de nutrientes para árboles de Eucalipto, en la región del Congo, los cuales explican alrededor de 90% del contenido de nutrientes en todos los componentes de árbol a excepción de las ramas, sugiriendo como explicación la realidad biológica de la plantación en campo y la variabilidad normal que existe al realizar muestreos y modelos *in situ*, a diferencia de los muestreos en invernadero o *in vitro*, los cuales no sufren estas distorsiones, pero tampoco reflejan la realidad biológica.

En los modelos de regresión de acumulación de micronutrientes que se presentan en el Cuadro 7 se observa que el Cu y el B son los nutrientes que presentan un comportamiento más estable de acuerdo a la ecuación $a * b^{(Edad)}$ a excepción de las ramas en donde ninguno de los microelementos tiene una tendencia exponencial, exceptuando el Zn cuyos coeficientes tienen un valor de p menor a 0,05 con un valor del R^2 sumamente bajo, lo que reduce las posibilidades de utilizar el modelo.

En cuanto al total acumulado durante los primeros 19 años de edad de los árboles (Cuadro 6), todos los micronutrientes tienen una tendencia exponencial y cumplen con los parámetros estadísticos evaluados, a excepción del Fe y el Al.

Cuadro 6. Modelos de regresión y parámetros estadísticos de acumulación de macronutrientos de árboles de *C. odorata* con edades entre 1 y 19 años, de acuerdo a cada componente, según la ecuación $y = a * b^{(edad)}$.

Tejido	Nutrimento (%)	Coeficientes		R ²	Error estandar		p-valor	
		a	b		a	b	a	b
Fuste	N	0,137	1,134	0,77	0,037	0,020	0,0022	<0,0001
	K	0,088	1,134	0,84	0,019	0,016	0,0004	<0,0001
	Ca	0,084	1,162	0,81	0,028	0,023	0,0084	<0,0001
	Mg	0,008	1,171	0,93	0,002	0,015	0,0002	<0,0001
	P	0,006	1,220	0,96	0,001	0,015	0,0004	<0,0001
	S	0,012	1,136	0,73	0,004	0,024	0,0071	<0,0001
Hojas	N	0,074	1,073	0,31	0,023	0,028	0,0069	<0,0001
	K	0,023	1,079	0,44	0,007	0,025	0,0037	<0,0001
	Ca	0,016	1,128	0,61	0,006	0,028	0,0192	<0,0001
	Mg	0,003	1,117	0,58	0,001	0,026	0,0011	<0,0001
	P	0,004	1,092	0,47	0,001	0,026	0,0073	<0,0001
	S	0,006	1,073	0,34	0,002	0,029	0,0089	<0,0001
Ramas	N	0,147	1,023	0,02	0,086	0,059	0,1131	<0,0001
	K	0,089	1,017	0,01	0,046	0,053	0,0757	<0,0001
	Ca	0,092	1,034	0,03	0,068	0,072	0,2008	<0,0001
	Mg	0,010	1,026	0,02	0,006	0,061	0,1267	<0,0001
	P	0,011	1,041	0,04	0,007	0,062	0,1517	<0,0001
	S	0,013	1,026	0,02	0,009	0,066	0,1522	<0,0001
Total	N	0,314	1,101	0,61	0,083	0,021	0,0021	<0,0001
	K	0,181	1,103	0,71	0,041	0,018	0,0005	<0,0001
	Ca	0,168	1,132	0,72	0,054	0,024	0,0072	<0,0001
	Mg	0,017	1,138	0,83	0,004	0,017	0,0008	<0,0001
	P	0,016	1,166	0,88	0,004	0,018	0,0014	<0,0001
	S	0,027	1,102	0,58	0,008	0,024	0,0050	<0,0001

Cuadro 7. Modelos de regresión y parámetros estadísticos de acumulación de micronutrientes de árboles de *C. odorata* con edades entre 1 y 19 años, de acuerdo a cada componente, según la ecuación $y = a * b^{(edad)}$. Valor $p < 0,05$ indica que el modelo es válido.

Tejido	Nutriente (ppm)	Coeficientes		R ²	Error estandar		p-valor	
		a	b		a	b	a	b
Fuste	Fe	88,389	1,063	0,07	73,390	0,075	0,249	<0,0001
	Cu	0,724	1,159	0,89	0,169	0,017	0,001	<0,0001
	Zn	8,124	1,098	0,46	3,018	0,030	0,018	<0,0001
	Mn	2,381	1,086	0,25	1,251	0,040	0,070	<0,0001
	B	1,736	1,139	0,82	0,433	0,018	0,001	<0,0001
	Al	88,870	1,071	0,08	73,847	0,073	0,249	<0,0001
Hojas	Fe	2,414	1,079	0,34	0,856	0,028	0,014	<0,0001
	Cu	0,164	1,082	0,47	0,046	0,024	0,003	<0,0001
	Zn	0,854	1,019	0,01	0,436	0,054	0,071	<0,0001
	Mn	0,585	1,068	0,21	0,245	0,037	0,032	<0,0001
	B	0,630	1,067	0,14	35,020	0,049	0,094	<0,0001
	Al	1,893	1,063	0,19	0,768	0,037	0,027	<0,0001
Ramas	Fe	57,163	1,009	0,01	37,547	0,069	14,533	<0,0001
	Cu	0,926	1,018	0,01	0,545	0,060	0,115	<0,0001
	Zn	8,088	1,013	0,01	6,015	0,077	0,024	<0,0001
	Mn	2,143	1,007	0,01	1,143	0,057	0,085	<0,0001
	B	1,615	1,023	0,02	1,007	0,063	0,135	<0,0001
	Al	59,390	1,007	0,01	40,940	0,073	0,173	<0,0001
Total	Fe	134,601	1,054	0,07	95,147	0,066	0,179	<0,0001
	Cu	1,534	1,121	0,76	0,383	0,019	0,001	<0,0001
	Zn	15,323	1,074	0,26	6,507	0,034	0,034	<0,0001
	Mn	4,582	1,069	0,23	1,967	0,038	0,035	<0,0001
	B	3,578	1,107	0,65	1,005	0,022	0,003	<0,0001
	Al	135,052	1,059	0,08	96,934	0,007	0,185	<0,0001

Los modelos de regresión han sido utilizados para explicar comportamientos biológicos y en el caso forestal para explicar la acumulación de biomasa y absorción de nutrientes; sin embargo estos modelos pueden variar de acuerdo al uso que se les quiera dar, por ejemplo en zonas del trópico donde la producción de madera es una de las actividades principales, las ecuaciones han sido diseñadas para el cálculo del volumen. En la actualidad la preocupación por el cambio climático ha hecho despertar el interés de la elaboración de modelos y ecuaciones para estimar la fijación de carbono y aumento de

biomasa (Picard et al. 2012). Aun así no se puede olvidar que estos se rigen por parámetros estadísticos, que deben cumplir para confirmar o rechazar el modelo y que serán estos valores estadísticos los que indiquen que tan representativo será el modelo a la hora de aplicarlo en la práctica.

La acumulación de N, K y Ca en los diferentes componentes del árbol (Figura 19), se relaciona con la biomasa del árbol, por lo que en los gráficos se presentan picos de valores causados por las diferencias de crecimiento de los árboles, los sitios y el manejo, aun así se puede observar una tendencia y diferencias en la acumulación de nutrimentos.

Las disminuciones en la cantidad de nutrimentos acumulados en los árboles pueden explicarse por diversos factores, uno de los más importantes es el manejo que se le dé a la plantación, ya que durante el ciclo de vida pueden haber reducciones significativas de biomasa durante la poda y raleo de los árboles.

El material resultante de las podas, raleos y restos de cosecha en plantaciones forestales son fuente importante de acúmulo de nutrimentos (Yamada et al. 2004; Palm 1995), por lo tanto se recomienda su reincorporación al suelo, además de la fertilización de los árboles. Para mantener la productividad de los sitios a largo plazo es importante minimizar la exportación de biomasa, darle un manejo adecuado a los desechos de cosecha y reponer los nutrimentos extraídos debido a la cosecha (Thiers et al. 2007).

La mayor cantidad absorbida de N, K y Ca se encuentra en el fuste seguido por las ramas y por último las hojas. Desde el primer hasta el décimo noveno año de crecimiento de los árboles, la acumulación se puede dividir en tres rangos: 1 a 3 años en donde el árbol crece y acumula nutrimentos de forma lenta, de 4 a 9 años en donde existe una acumulación media pero por las diferencias de la biomasa del árbol no se puede observar un patrón claro y de 10 a 19 años cuando la absorción de nutrimentos aumenta de gran manera en comparación a las edades anteriores.

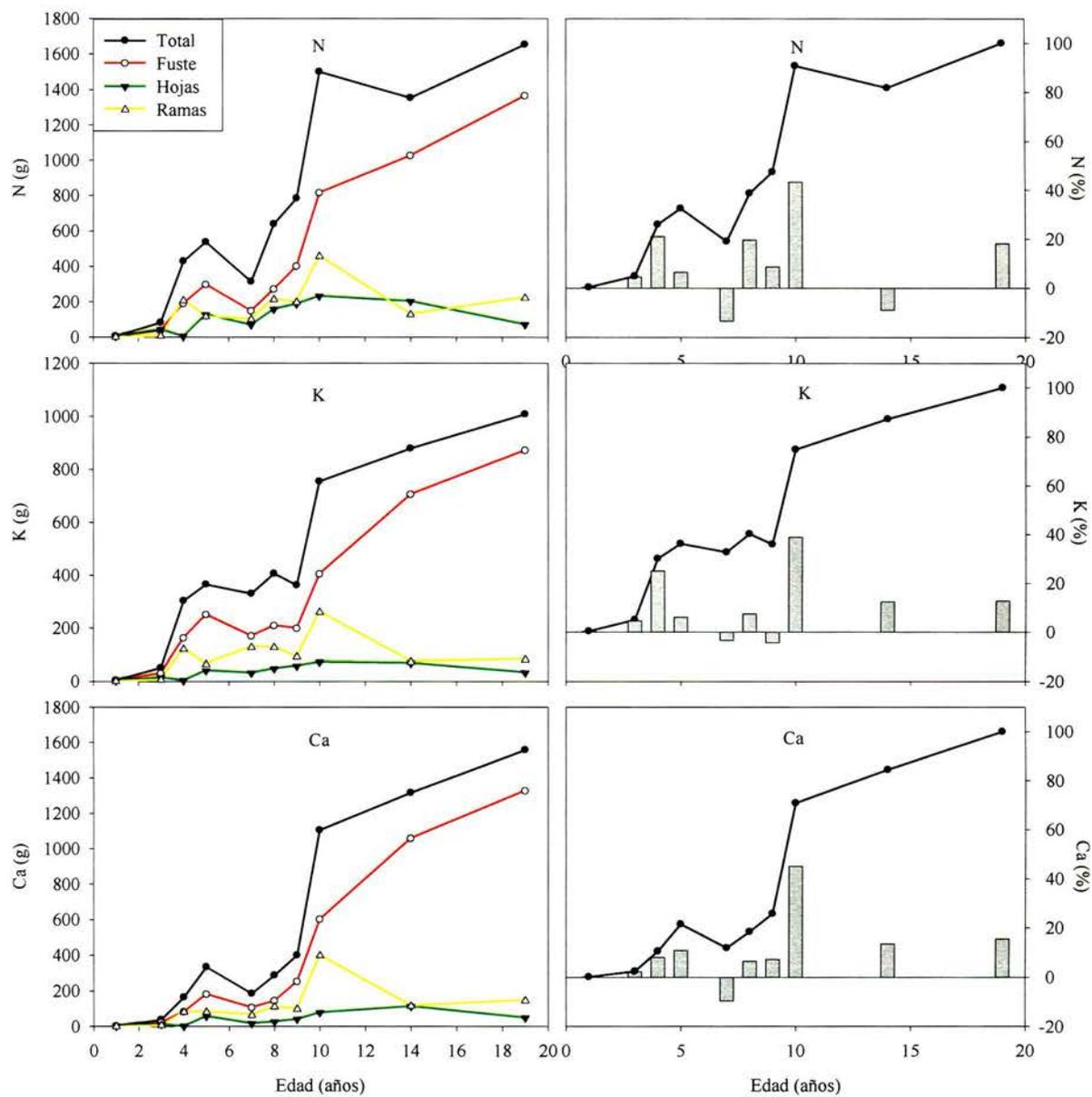


Figura 19. Acumulación de N, Ca y K en diferentes componentes y porcentaje total acumulado en árboles de *C. odorata* con edades entre 1 y 19 años.

La acumulación de P, Mg y S (Figura 20) sigue el mismo comportamiento que los macronutrientes discutidos anteriormente, sin embargo se destaca la cantidad de P absorbido y acumulado por el fuste, en contraste al Mg y S, elementos que se acumulan en menor cantidad que el P.

Estos resultados ponen en evidencia la importancia que tienen las partes no comerciales del árbol de *C. odorata* desde el punto de vista de nutricional, ya que poseen gran cantidad de nutrientes que se pueden incorporar al sistema una vez que estos restos se descomponen. Merino *et al* (2003) realizaron un estudio en árboles de pino y pone en evidencia la importancia de la acumulación de nutrientes en estos componentes, además sugiere que es importante la reincorporación de la fracción no maderable y la aplicación de fertilizante con mucha más razón en suelos poco fértiles.

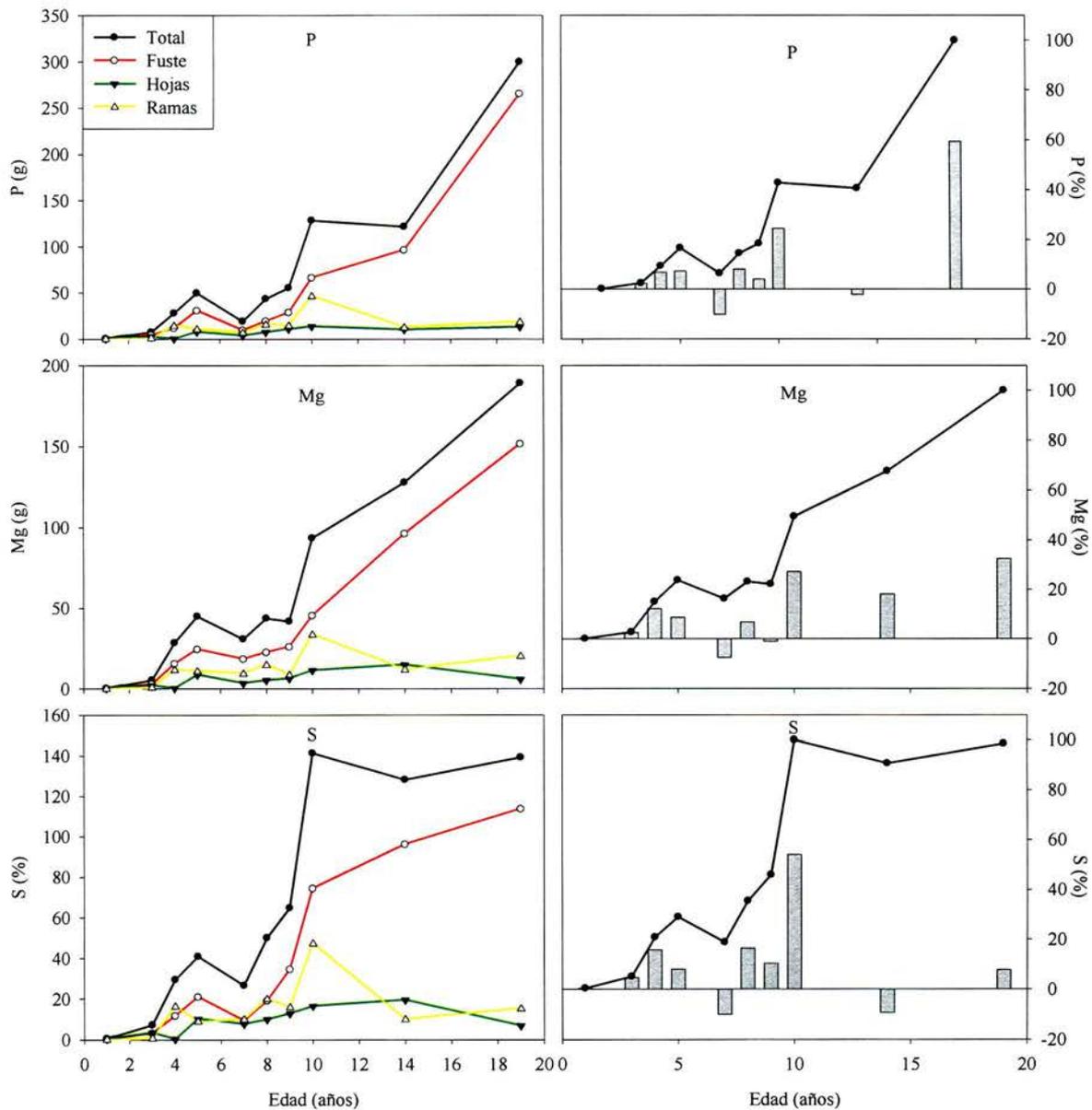


Figura 20. Acumulación de P, Mg y S en diferentes componentes y porcentaje total acumulado en árboles de *C. odorata* con edades entre 1 y 19 años.

1.3. Programas y prácticas de fertilización a pequeños productores

La fertilización de la especie puede hacerse de tantas maneras como pequeños agricultores se interesen en ella y en la mayoría de los casos sin ningún sustento técnico. La práctica más común es plantar los árboles en sistemas agroforestales o en potreros, por lo que si en algo se fertilizan es con lo que recibe el cultivo o pasto-ganado asociado; en menor escala, algunos de los asociados a Coopeagri R.L. tienen pequeños espacios (menos de 2 ha) plantados con cedro proveniente de los viveros de la empresa. De esta manera, a continuación se discutirá la fertilización en cultivo asociado y la del cultivo del cedro en plantación.

Muchos de los árboles que crecen en la zona están asociados en sistemas agroforestales de café-cedro, lo cual cambia el crecimiento del árbol y por ende su fertilización, si se toma en cuenta la fertilización recomendada para café vamos a tener entre 800 y 1000 kg ha⁻¹ de fertilizante 18-5-15-6 distribuidas en dos aplicaciones anuales, y una tercera aplicación de alrededor de 200 kg ha⁻¹ de nitrato de amonio. De forma práctica se podrían aplicar alrededor de 100 g/árbol de cada una de las fórmulas mencionadas anteriormente, a la hora de hacer la fertilización al café, y además reforzar al cuarto y sétimo año (momento en que se tiende hacer poda de ramas) con fórmulas altas en N y K₂O.

Los suelos en donde se tomaron las muestras estudiadas y en donde se encuentran un alto porcentaje de productores asociados a Coopeagri R.L. pertenecen al orden de los Ultisoles (Figura 21) los cuales, por su mineralogía son ricos en óxidos de Fe y Al, lo que desde el punto de vista nutricional puede tener efectos en la disponibilidad de P; además poseen una baja fertilidad debido a la poca capacidad de intercambio catiónico (Bertsch 1998), lo que sumado a las altas precipitaciones de los sitios puede provocar la lixiviación de N, Ca, Mg y K.

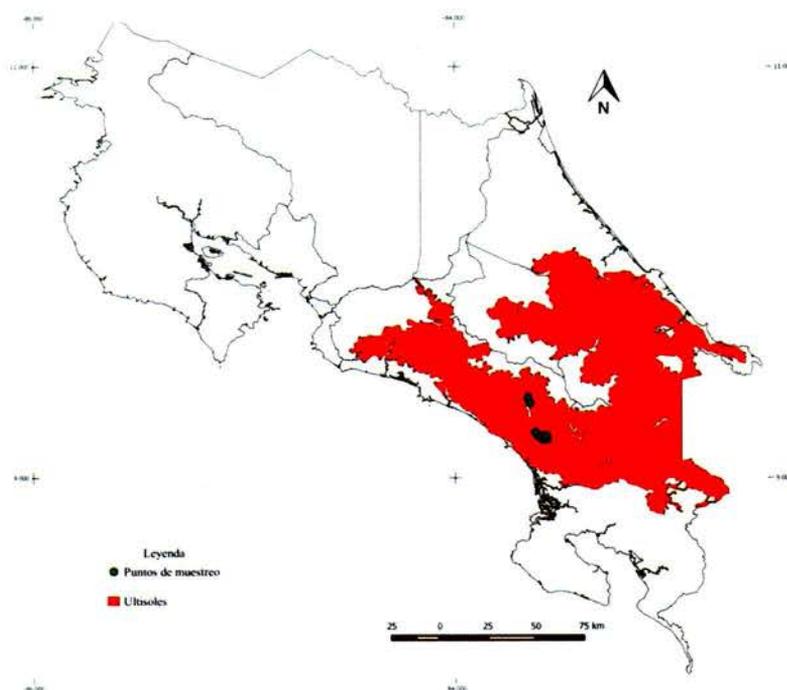


Figura 21. Mapa del orden del suelo en la zona donde se realizaron los muestreos de árboles de *Cedrela odorata* pertenecientes a productores asociados a Coopeagri R.L (Basado en Mata *et al.* 2013).

En sistemas agroforestales el aprovechamiento de los fertilizantes aplicados al suelo es mucho más eficiente, debido a la existencia de una mayor cantidad de raíces en el suelo (cultivo y árboles), de manera que parte del fertilizante lixiviado puede ser aprovechado por el sistema, Ewel y Bigelow (2011) encontraron en experimentos llevados a cabo en Costa Rica y Panamá que en árboles deciduos sembrados en policultivo una pérdida de 7,24 kg NO₃ por año mientras que en árboles en monocultivo la pérdida anual fue de 12,7 kg de NO₃, mientras que policultivo de árboles no deciduos mostraron una mayor retención de Ca y Mg. Aun así mucha de esta eficiencia dependerá del suelo y de las condiciones climáticas del sitio, por lo tanto se recomienda hacer un fraccionamiento óptimo del fertilizante con el fin de reducir estas pérdidas.

En cuanto a las prácticas de fertilización más comunes que hacen muchos de los productores asociados a Coopeagri R.L está la incorporación al cafetal o al cacaotal y a los árboles asociados de 50 g de fertilizante 10-30-10 al momento de la siembra en mezcla con 1 kg de abono orgánico; se aplica además 50 g de urea o nitrato de amonio tanto al inicio como al final de las lluvias en los años posteriores; en los pastizales, la práctica más común es no adicionar ningún tipo de fertilizante. Aunque no lo mencionan los encargados de las plantaciones y animales, el sistema de reciclaje natural en el área también actúa sobre el sistema de producción, por lo que se asume que otros aportes de nutrimentos como i) N de la lluvia (aproximadamente $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y ii) otra cantidad apreciable de nutrimentos proveniente del desmonte al preparar el terreno, la descomposición de residuos del cafeto y de caída de hojas y de las podas de los árboles también contribuyen a la nutrición (la descomposición de la hojarasca puede alcanzar las $12 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ según Maldonado *et al.* 2006), al menos para balancear la extracción como cosecha y las pérdidas de nutrimentos causada por el lavado de los mismos a través de la esorrentía y la lixiviación tal cual proponen Spagenberger y Fölster (2002) para mantener la sostenibilidad del ecosistema. Como mencionan Russell *et al.* (2004) y Boley *et al.* (2009) para condiciones de bosque tropical lluvioso de Costa Rica, la acumulación o pérdida de C en el suelo puede ser sorprendentemente rápida encontrando una disminución del 24% o $0,9 \text{ mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en una plantación de *C. odorata* de un año de edad en La Selva; Boley *et al.* (2009) encontraron una disminución del contenido de materia orgánica y de K y Mg en el horizonte B y de Ca en el horizonte O/A en plantaciones de *T. grandis* en Pérez Zeledón, en relación al bosque natural y plantaciones mixtas de otras especies. Para este tipo de ecosistemas y con el fin de mejorar la productividad del mismo, se podría recomendar lo siguiente:

- Mantener limpio de malezas en especial en las pasturas el terreno alrededor de los árboles
- Utilizar el mejor material genético posible de manera que pueda mantenerse el crecimiento apical de la especie después de los ataques de *Hypsipyla grandella* y que se puede reducir con la adición de fertilizante según varios autores (Haggar y Ewel 1994; Rodgers et al. 1995)
- Asumir que los elemento menores que requiere la especie los suple eficientemente el suelo
- Adicionar 250 g de fórmula de fertilizante completa al momento de plantar los árboles en potreros.
- Las plántulas deberán micorrizarse antes de plantarse en el terreno de forma definitiva según recomienda Méndez (2012)
- Tratar de mantener los residuos de cosecha del cafeto y de podas de los árboles en el campo para mantener los niveles de materia orgánica del suelo.

Fertilización del cedro en plantaciones puras: En plantaciones puras varios autores han encontrado que la fertilización al momento de la plantación favorece la tasa de sobrevivencia y causa un mayor el crecimiento de las plántulas de cedro en altura y en diámetro con la adición de 50 g de 10-30-10 o 12-24-12 (CONAFOR 2000), de 57 g de 17-17-60 (Castillo 2008) y de 50 g de fórmula completa al fondo a la siembra con dos aplicaciones adicionales de 50 g cada tres meses, la última de urea para fortalecer la plántula con la incorporación de N (Ponce 2010). Sin embargo las dosis a utilizar varían con la fertilidad natural del suelo de manera que cuando la fertilidad es baja se recomienda adicionar 80 g árbol⁻¹ y luego una segunda fertilización 120 g árbol⁻¹ de 10-30-10 a los seis meses de edad (Montagnini 1992). Fierros et al. (1999) prefieren adicionar 100-150 g árbol⁻¹ a los 15-30 días después del trasplante de fórmulas altas en P como las 17-17-17, 10-34-6, 10-28-6, 5-30-10, 10-30-10 y 5-30-6. En base a lo anterior y con el fin de sugerir un programa de fertilización técnico para las plantaciones de pequeña escala en la zona sur, se asume lo siguiente:

- Las plantaciones se efectuarán solamente en sitios considerados de clase I a II según los criterios mencionados por Alvarado (2012)
- En caso de utilizarse potreros, deberá ararse profundo o subsolar para evitar problemas de compactación superficial ya que según Castaing (1982) y (Murillo 2008) el sistema radical de la especie es muy superficial y se ve afectada cuando la densidad aparente es alta
- Como para la mayoría de los micronutrientes en árboles de 1 a 19 años no se cumple una tendencia de absorción en el tiempo, se asume que el suelo suplirá los elementos menores en cantidad suficiente
- Se calculará la cantidad de nutrientes absorbidos por la especie de manera anual
- Se adicionará fertilizante de acuerdo a los ciclos de crecimiento de la especie
- No se adicionará fertilizante después del 9º año de crecimiento

Para conocer las necesidades de fertilización de forma más precisa se calcularon las posibles entradas de nutrientes al sistema (Cuadro 8); para la disponibilidad de nutrientes se tomaron los datos descritos por Chaves (2014) quien resumió los datos de análisis químicos de diferentes zonas cafetaleras de Costa Rica, dentro de las cuales se encuentra Pérez Zeledón, región de donde se tomaron 1364 muestras entre los años 2007 y 2011 y se analizaron en el laboratorio químico del ICAFE, utilizando como solución extractora Olsen modificado, se tomó el promedio de estas muestras y una densidad aparente del suelo de $1,05 \text{ Mg m}^{-3}$ para suelos Ultisoles (Alvarado y Forsythe 2005). La adición de nutrientes por la lluvia se obtiene de trabajos de diferentes autores y recopilados por Alvarado (2012)².

Cuadro 8. Cálculo de las entradas de nutrimentos en plantaciones de *C. odorata* en la zona sur de Costa Rica.

Elemento	Adición de nutrimentos al año (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)			
	1	3	5	9
Disponibles en el suelo				
N	nd	nd	nd	nd
P	20	20	20	20
K	296	296	296	296
Ca	1080	1080	1080	1080
Mg	182	182	182	182
S	nd	nd	nd	nd
Adiciones por mineralización de residuos				
N	5	5	5	5
P	2	2	2	2
K	4	4	4	4
Ca	5	5	5	5
Mg	4	4	4	4
S	2	2	2	2
Adiciones por lluvia				
N	5	5	5	5
P	1	1	1	1
K	10	10	10	10
Ca	15	15	15	15
Mg	10	10	10	10
S	1	1	1	1
Total de adiciones al ecosistema				
N	10	10	10	10
P	23	23	23	23
K	310	310	310	310
Ca	1100	1100	1100	1100
Mg	196	196	196	196
S	3	3	3	3
Continúa...				

	Total disponible según eficiencia de uso			
	N	7	7	7
P	9	9	9	9
K	248	248	248	248
Ca	880	880	880	880
Mg	157	157	157	157
S	2	2	2	2

En el cuadro 9 se detallan los valores de pérdidas de nutrimentos en el ecosistema, la absorción de nutrimentos por parte del árbol representa la mayor cantidad de nutrientes extraídos del sistema, estos valores se obtuvieron de acuerdo a los datos encontrados en este trabajo y bajo una densidad de 210 árboles por hectárea.

Cuadro 9. Cálculo de las salidas de nutrimentos en plantaciones de *C. odorata* en la zona sur de Costa Rica.

	Elemento	Salida de nutrimentos al año (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)			
		1	3	5	9
SALIDAS	Absorción de nutrimentos al año (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)				
	N	1,3	17	203	299
	P	0,1	2	16	21
	K	0,5	8	105	144
	Ca	0,1	1	15	18
	Mg	0,9	11	140	161
	S	0,1	2	15	24
	Salidas por lavado y erosión				
	N	19	19	19	19
	P	0	0	0	0
	K	4	4	4	4
	Ca	6	6	6	6
	Mg	9	9	9	9
	S	nd	nd	nd	nd
Continúa...					

Total de salida de elementos (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)				
N	21	37	222	318
P	0	2	16	21
K	4	12	108	148
Ca	6	7	21	24
Mg	9	19	149	170
S	0	2	15	24

La diferencia de nutrimentos de acuerdo a las entradas y salidas de estos en el ecosistema se muestran en el Cuadro 10, los valores negativos representan la cantidad de nutrimentos que el ecosistema no pudo suplir en los 9 años de edad de árbol, por lo que habría que suplirlos con fertilizante. Si bien se puede observar que el sistema suple la cantidad total de Ca, se deberá aplicar una cierta cantidad de CaCO₃ la cual representa el 80% de la cantidad de urea recomendada, con el fin de disminuir la acidez causada por este fertilizante.

Cuadro 10. Cálculo del balance de nutrimentos (entradas menos salidas), materias primas y cantidad de fertilizante necesarios para suplir las necesidades nutricionales de *C. odorata* en plantaciones la de la zona sur de Costa Rica

Elemento	Diferencia entre entradas y salidas (kg ha ⁻¹)			
	1	3	5	9
N	-14	-30	-215	-311
P	9	8	-7	-11
K	244	237	140	100
Ca	874	873	859	856
Mg	148	138	8	-13
S	2	1	-12	-22
Fórmula	Materia prima necesaria (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)			
	1	3	5	9
N	32	69	301	373
P ₂ O ₅	0	0	10	13
K ₂ O	0	0	0	0
CaO	0	0	0	0
MgO	0	0	0	16
SO ₄	0	0	17	26

Fórmula	Fertilizante a aplicar (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)				
	1	3	5	7	9
Urea	70	149	654	405	405
CaCO ₃	56	119	523	324	324
Sulfato de Mg.	0	0	81	124	124

Los fertilizantes recomendados representan materias primas de bajo costo y que suplen los requerimientos del árbol, con el fin de que los productores tengan la mayor rentabilidad posible del cultivo. Si bien se pueden usar otras fórmulas de fertilizantes la prioridad en este caso es suplir N, por lo que la urea nos daría el mayor porcentaje de este nutrimento, mientras que con otras fórmulas habría que aumentar las dosis puesto que tienen una menor cantidad de N.

1.4. Conclusiones

- Para la acumulación de macronutrientes el modelo de regresión $y = a \cdot b^{(\text{edad})}$ es estadísticamente válido para el fuste, hojas y el total acumulado.
- N es el nutrimento que más se acumula en todos los componentes del árbol.
- De acuerdo a la cantidad acumulado a los 19 años se puede hacer la siguiente clasificación N>Ca>K>P>Mg>S.

3. Literatura citada

- Alderete A, Zapata G, Ojeda A, Guevara E, De la Cruz N, Guerra J, Brito R, Amador L. 2010. Evaluation of growth *Cedrela odorata* L. in a secondary vegetation area. *Research Journal of Forestry* 4(3):145-150.
- Attiwill P. 1995. Nutrient cycling in plants. In *Encyclopedia of Environmental Biology*, (W. A. Nierenberg, ed.). Academic Press, San Diego. Vol. 2, pp. 624-629.
- Alvarado A. 2012. Nutrición y fertilización de *Cedrela odorata*. Capítulo 11. In ALVARADO A, RAIGOSA J (eds.). *Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 209-215.
- Alvarado A². 2012. Reciclaje de nutrimentos en plantaciones y bosques tropicales. Capítulo 2. In ALVARADO A, RAIGOSA J (eds.). *Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales*. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica. 209-215
- Alvarado A, Forsythe W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 29(1): 85-94
- Andrés P, Salgado C, Espelta J. 2011. Optimizing nursery and plantation methods to grow *Cedrela odorata* seedlings in tropical dry agroecosystems. *Agroforestry Systems*. 83:225-234
- Arnáez E, Flores E. 1988. Características de la madera de *Cedrela odorata* L. (cedro amargo, Meliaceae) en Costa Rica. *Revista Biología Tropical* 36(1):67-73.

- Avellán, M. 2012. Determinación y variación de la concentración foliar de nutrimentos de *Gmelina arborea* Roxb. en Osa, Golfito y Corredores, Costa Rica. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 87 p.
- Asociación Costarricense para el Estudio de Especies Forestales Nativas. 1992. Segundo encuentro regional sobre especies forestales nativas de la zona norte y atlántica de Costa Rica. Set. 24-25, 1992. Estación Biológica La Selva, Puerto Viejo, Sarapiquí, Costa Rica. 90 p.
- Bolaños R, Watson V, Tosi J. 2005. Mapa ecológico de Costa Rica (Zonas de Vida), según el sistema de clasificación de zonas de vida del mundo de L.R. Holdridge, Escala 1:750 000. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica.
- Boley J, Drew A, Andrus R. 2009. Effects of active pasture, teak (*Tectona grandis*) and mixed native plantations on the soil chemistry in Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 257:2254-2261.
- Binkley D, Stape J, Ryan M, Barnard H, Fownes J. 2002. Age-related decline in forest ecosystem growth: an individual-tree, stand-structure hypothesis. *Ecosystems* 5:58-67.
- Brunck F. 1987. Tropical forest species. In. Martin-Prével P, Gagnard J, Gautier P (eds.) *Plant analysis as a guide to the nutrient requirements of temperate and tropical crops*. N.Y. USA. Lavoisier Publishing. pp. 479-486.
- Cantillo E. 1992. Efecto de la fertilización en vivero en el crecimiento de *Alnus jorullensis*, *Cedrela montana* y *Laphoensia speciosa* a diferentes dosis de N.P.K. *Revista Colombiana Forestal* 3(5):6-16.
- Castaing A. 1982. Algunos factores edáficos y dasométricos relacionados con el crecimiento y comportamiento de *Cedrela odorata* L. Tesis de Maestría. Programa Recursos Naturales UCR/CATIE. Turrialba, Costa Rica. 123 p.

- Castillo E. 2008. Crecimiento del cedro (*Cedrela odorata* L.) en etapa juvenil bajo riego, fertilización y aplicación de insecticida y su relación con la incidencia de *Hypsipyla grandella* Z. Tesis Maestro en Ciencias. Programa de Producción Agroalimentaria en el Trópico, Colegio de Posgraduados. H. Cárdenas, Tabasco, México. sp. (anexos).
- Chaves V. 2014. Caracterización de la fertilidad de suelos cafetaleros de Costa Rica. Instituto del café de Costa Rica. 56pp
- Cintron B. 1990. *Cedrela odorata* L. Cedro hembra, Spanish cedar. In: Burns, Russell M.; Honkala, Barbara H., eds. *Silvics of North America: 2. Hardwoods. Agric. Handbook*. 654. United States Department of Agriculture. Forest Service. pp. 250-257.
- CONABIO. 1999. *Cedrela odorata* L. Disponible en línea en: http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/36-melia2m.pdf. Consultado el 27/07//2013.
- CONAFOR. 2000. Experiencias forestales de comunidades mexicanas. Estados Unidos Mexicanos.
- Constantinides M, Fownes J. 1994. Nitrogen mineralization from leaves and litter of tropical plants: relationship to nitrogen, lignin and soluble polyphenol concentrations. *Soil Biology and Biochemistry* 26(1):49–55.
- Cubero J, Rojas S. 1999. Fijación de carbono en plantaciones de melina (*Gmelina arborea*), teca (*Tectona grandis*) y pochote (*Bombacopsis quinata*) en los cantones de Hojanca y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. San José, Costa Rica. pp. 6-9.

- Delagrange S, Potvin C, Messier C, Coll L. 2008. Linking multiple-level tree traits with biomass accumulation in native tree species used for reforestation in Panama. *Trees* 22:337-349.
- De la Rosa V, Díaz M, Contreras G, Jiménez C, Edzná C, Mococho C. 2011. Effects of environmental factors on the incidence of *Hypsipyla grandella* Zeller in plantations of *Cedrela odorata* L. In: VI Reunión Nacional de Innovación Forestal. León, Guanajuato, MX. 85 p.
- DeLucia E, Callaway R, Schlesinger W. 1994. Offsetting changes in biomass allocation and photosynthesis in ponderosa pine (*Pinus ponderosa*) in response to climate change. *Tree Physiology* 14:669-677.
- DeLucia E, Schlesinger W. 1995. Photosynthetic rates and nutrient-use efficiency among evergreen and deciduous shrubs in Okefenokee swamp. *Intl. J. Plant Sci.* 156:19–28.
- Díaz M, Contreras G, Jiménez C, Centeno E, Rivera L. 2011. Manejo de la vegetación y control integral de *Hypsipyla grandella*, en plantaciones de cedro, en Yucatán, México. In: VI Reunión Nacional de Innovación Forestal. León, Guanajuato, MX. 83 p.
- Dickens ED, Barnett JP, Hubbard WG, Jokela EJ (eds). 2004. Slash pine: still growing and growing! Proceedings of the slash pine symposium. Gen. Tech. Rep. SRS-76. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 148 p.
- Dinkelmeyer H, Lehmann J, Renck A, Trujillo L, Da Silva J, Gebauer G, Kaiser K. 2003. Nitrogen uptake from ¹⁵N-enriched fertilizer by four tree crops in an Amazonian agroforest. *Agroforestry Systems* 57:213–224.

- Dünisch O, Bauch J, Gasparotto L. 2002. Formation of increment zones and intra-annual growth dynamics in the xylem of *Swietenia macrophylla*, *Carapa guianensis*, and *Cedrela odorata* (Meliaceae). *IAWA Journal* 23(2):101–119.
- Dünisch O, Ribeiro V, Bauch J. 2003. Dendroecological investigations on *Swietenia macrophylla* King and *Cedrela odorata* L. (Meliaceae) in the central Amazon. *Trees* 17:244–250.
- Ericsson T, Kähr M. 1995. Growth and nutrition of birch seedlings at varied relative addition rates of magnesium. *Tree Physiology* 15:85-93.
- Ewel J, Bigelow S. 2011. Tree species identity and interactions with neighbors determine nutrient leaching in model tropical forests. *Oecologia* 167:1127-1140.
- Fernández J, Murillo R, Portuguez E, Fallas J, Rios V, Kottman F, Verjans M, Mata R, Alvarado A. 2013. Nutrient concentration age dynamics of teak (*Tectona grandis* L.f.) plantations in Central America. *Forest Systems* 22(1):123-133.
- Fierros A, Noguéz A, Velasco E. 1999. Paquetes tecnológicos para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales en ecosistemas de climas templados-fríos y tropicales de México. Vol. I. SEMANARP.
- Flückiger W, Braun S. 2003. Critical limits for nutrient concentrations and ratios for forest trees –a comment. Institute for Applied Plant Biology. Schönenbuch. Switzerland
- Foli E, Alder D, Miller H, Swaine M. 2003. Modeling growing space requirements for some tropical forest tree species. *Forest Ecology and Management* 173:79-88.
- FONAFIFO. 2007. Fondo Nacional para el Financiamiento Forestal. Disponible en línea en <http://www.fonafifo.go.cr/>. Revisado el 02 de abril del 2013.
- Fromm J. 2010. Wood formation of trees in relation to potassium and calcium nutrition. *Tree Physiology* 30:1140–1147.

- García C, Vera G, Carrillo F, Salvador O. 2008. El cedro rojo (*Cedrela odorata*) como alternativa de reconversión en terrenos abandonados por la agricultura comercial en el sur de Tamaulipas. *Agricultura Técnica en México* 34(2):243-250.
- González D. 1991. Descripción anatómica de once especies forestales de uso industrial en Panamá. Costa Rica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba. CR. 61 p.
- Guevara G. 1988. Experiencias colombianas con cedro (*Cedrela odorata* L.). Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal. Bogotá, Colombia. Serie de Documentación, N° 12. 86 p.
- Haggar J, Ewel J. 1995. Establishment, resource acquisition, and early productivity as determined by biomass allocation patterns of three tropical tree species. *Forest Science* 41(4):689-708.
- Hall J, Love B, Garen E, Slusser J, Saltonstall K, Mathias S, Van Breugel M, Ibarra D, Bork E, Spaner D, Wishnie M, Ashton M. 2011. Tree plantations on farms: Evaluating growth and potential for success. *Forest Ecology and Management* 261(10):1675–1683.
- Hase H, Foelster H. 1983. Impact of plantation forestry with teak (*Tectona grandis*) on the nutrient status of young alluvial soils of West Venezuela. *Forest Ecology Management* 6:33–57.
- Hedin L. 2004. Global organization of terrestrial plant nutrient interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* 101(30):10849–10850.
- Hiremath A, Ewel J, Cole T. 2002. Nutrient Use Efficiency in Three Fast-Growing Tropical Trees. *Forest Science* 48(4):662-672.

- Imai N, Kitayama K, Titin J. 2012. Effects of logging on phosphorus pools in a tropical rainforest of Borneo. *Journal of Tropical Forest Science* 24(1):5–17.
- IMN. 2013. Resúmenes históricos y diarios de precipitación y temperatura, para las estaciones de San Isidro del General. Instituto Meteorológico Nacional. San José. Costa Rica.
- Jiménez N. 2012. Producción de madera y almacenamiento de carbón en cafetales con cedro (*Cedrela odorata*) y caoba (*Swietenia macrophylla*) en Honduras. Tesis de maestría en Agroforestería Tropical. CATIE. Costa Rica. 20-30 pp.
- Kalra Y. 1998. Handbook of reference methods for plant analysis. Soil and Plant Analysis Council, Inc. Boca Raton, FLA, CRC Press. 300 p.
- Kozłowski T, Pallardy S. 1997. Physiology of woody plants. Third Edition. Academic Press. 811 p.
- Lamb A. 1968. *Cedrela odorata*, fast growing timber trees of the lowland tropics. No.2. Oxford. Commonwealth Forestry Institute. UK.
- Laclau J, Bouillet J, Ranger J. 2000. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of Eucalyptus in Congo. *Forest Ecology and Management* 128:181-196.
- Lautner S, Fromm J. 2010. Calcium-dependent physiological processes in trees. *Plant Biology* 12:268–274.
- Lemmens R, Soerianegara I, Wong W. 1995. Plant resources of South-East Asia Timber trees: minor commercial timbers. No. 5 (2). 655 p.
- Longwood F. 1962. Present and potential commercial timbers of the Caribbean. Agric. Handbook No. 207. Washington, D.C., USA.

- Lugo A, Brown S, Chapman J. 1988. An analytical review of production rates and stemwood biomass of tropical forest plantations. *Forest Ecology and Management*. 23:179-200.
- Mata R, Rosales A, Vásquez A, Sandoval D. 2013. Mapa de órdenes de suelos de Costa Rica. 2a Ed. San José, Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. Esc 1: 200.000. Color
- Malavolta E. 1980. Elementos de nutrição mineral de plantas. Agronômica Ceres, São Paulo. 251 p.
- Maldonado F, Jasso J, Palma D, Salgado S, González V. 2006. Dinámica de materia orgánica, P y K en suelos de sistemas agroforestales ‘cedro-plátano’ en Tabasco, México. *Fitotecnia Mexicana* 29(3):223-230.
- Marion G. 1979. Biomass and nutrient removal in long-rotation stands. In *Impact of Intensive Harvesting on Forest Nutrient Cycling*. pp. 98–110.
- Marschner H. 2002. Mineral nutrition of higher plants. Second Ed. Academic Press. 4-16 p
- Mateo J, Bonifacio R, Pérez S, Capulín J, Mohedano L. 2011. Producción de (*Cedrela odorata*) en aserrín crudo con diferentes dosis de fertilización, en Tecpan de Galeana, Guerrero. *Ra Ximhai* 7(2):195-204.
- Mena G, Castillo A, Cob J. 2000. Informe final proyecto disminución de la contaminación de las aguas del río Virilla. Compañía Nacional de Fuerza y Luz. Convenio Bilateral de Desarrollo Sostenible Costa Rica / Holanda. San José, Costa Rica. s.p.
- Méndez H. 2012. Diversidad de hongos micorrícicos arbusculares asociados al cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) en dos ecosistemas tropicales de Veracruz, México. Tesis de

- doctorado. Subdirección de Posgrado, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. México. 182 p.
- Merino A, Rey C, Brañas R, Rodríguez R. 2003. Biomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Investigación agraria. Sistemas y Recursos Forestales 12(2):85-97.
- Millard, P. 1995. Internal cycling of nitrogen in trees. Acta Horticulturae 386:3-14.
- Montagnini F. 1992. Sistemas agroforestales: principios y aplicaciones en los trópicos. Organización para Estudios Tropicales (OTS) /Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) Turrialba, Costa Rica. 622 p.
- Montagnini F, Ramstad K, Sancho F. 1993. Litterfall, litter decomposition and the use of mulch of four indigenous tree species in the Atlantic lowlands of Costa Rica. Agroforestry Systems 23(1):39-61.
- Muñoz F, Coria A, Orozco G, García M, Barrera A. 2011. Evaluación dasométrica de plantaciones comerciales de *Cedrela odorata* L. y *Acrocarpus fraxinifolius* Wight y Arn. In Múgica, Michoacán. VI Reunión Nacional de Innovación Forestal.
- Murillo R, Alvarado A, Verjans J. 2014. Concentración foliar de nutrimentos en plantaciones de teca en la cuenca del canal de Panamá. Agronomía Costarricense 38(1):11-18
- Murillo Y. 2008. Determinación de aclareo en plantaciones de cedro (*C. odorata*) en el estado de Tabasco. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. MX. 110 p.
- Navarro C, Ward S, Hernández M. 2002. The tree *Cedrela odorata* (Meliaceae): a morphologically subdivided species in Costa Rica. Revista Biología Tropical 50(1):21-29.

- Niinemets Ü. 1999. Differences in chemical composition relative to functional differentiation between petioles and laminas of *Fraxinus excelsior*. *Tree Physiology* 19:39-45.
- Oehlund J, Naesholm T. 2001. Growth of conifer seedlings on organic and inorganic nitrogen sources. *Tree Physiology* 21:1319–1326.
- Omoyiola B. 1973. Initial observation on *Cedrela odorata* provenance trial in Nigeria. En: Burley J, Nikles D, eds. *Tropical provenance and progeny research and international cooperation*. Commonwealth Forestry Institute. pp 250-254.
- Orwa C, A Mutua, Kindt R, Jamnadass R. 2009 *Agroforest tree database: a tree reference and selection guide version 4.0*
(<http://www.worldagroforestry.org/sites/treedbs/treedatabases.asp>)
- Palm C. 1995. Contribution of agroforestry trees to nutrient requirements of intercropped plants. *Agroforestry Systems* 30:105-124.
- Paniagua A, Toruño H. 2004. Determinación de necesidades nutrimentales para las especies *Swietenia macrophylla* y *Cupressus lusitanica* en pruebas de invernadero. *Revista Chapingo* 10(1):37-41.
- Parker J. 1956. Variations in copper, boron, and manganese in leaves of *Pinus ponderosa*. *Forest. Science* 2:190–198.
- Petit B, Montagnini F. 2006. Growth in pure and mixed plantations of tree species used in reforesting rural areas of the humid region of Costa Rica, Central America. *Forest Ecology and Management* 233: 338–343.
- Pérez P. 2009. Fertilización de NPK y demanda nutricional de cuatro especies forestales en fase temprana de crecimiento. Tesis para Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Tabasco, México. pp 35-50.

- Picard N, Saint-André L, Henry M. 2012. Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles. Del trabajo de campo a la predicción. CIRAD y FAO. pp. 175-192.
- Piotto D, Víquez E, Montagnini F, Kanninen M. 2004. Pure and mixed plantations with native species of the dry tropics of Costa Rica: a comparison of growth and productivity. *Forest Ecology and Management* 190(2-3):359-372.
- Ponce E. 2010. Manejo de plantaciones de cedro y caoba: Manual del propietario. ESNACIFFOR-PCQ. Tegucigalpa, Honduras. 64 p.
- Portuguez E. 2012. Estimación de la extracción de nutrimentos por parte aérea en plantaciones de teca (*Tectona grandis* Linn. f.) de las empresas Panamerican Woods y C&M Investment Group Ltda. en la península de Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Práctica dirigida Lic. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 72 p.
- Punches J. 2004. Tree growth, forest management and their implications for wood quality. Pacific Northwest Extension Publishing. 576. 2:8.
- Ralston C, Prince A. 1965. Accumulation of dry matter and nutrients by pine and hardwood forests in the Lower Piedmont of North Carolina. *Forest soil relationships in North America*. pp. 77-94
- Ramírez C, Vera G, Carrillo F, Magaña O. 2008. El cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) como alternativa de reconversión en terrenos abandonados por la agricultura comercial en el sur de Tamaulipas. *Agricultura Técnica en México* 34(2):243-250.
- Rodgers HL, Brakke MP, Ewel J. 1995. Shoot damage effects on starch reserves of *Cedrela odorata*. *Biotropica* 27(1):71-77.

- Russell A, Cambardella C, Ewell J, Parkin T. 2004. Species, rotation, and life-form diversity effects on soil carbon in experimental tropical ecosystems. *Ecological Applications* 14(1):47-60.
- Spagenberger 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.
- Rennenberg H, Wildhagen H, Ehling B. 2010. Nitrogen nutrition of poplar trees. *Plant Biology* 12:275–291 pp
- Saint-André L, Thongo M'Bou, A, Mabiala A, Mouvondy W, Jourdan, C, Roupsard O, Deleporte P, Hamel O, Nouvellon Y. 2005. Age-related equations for above- and below-ground biomass of a *Eucalyptus* hybrid in Congo. *Forest Ecology Management* 205 (1-3): 199–214.
- Salas J. 1993. Árboles de Nicaragua. Instituto Nicaragüense de Recursos Naturales y de ambiente (IRENA). Managua. NI. pp. 390-394.
- Salazar R, Joker D, Schmidt L. 2000. Seed leaflet *Cedrela odorata*. Danida Forest Center. Denmark. 20:1-2.
- Salisbury F, Ross C. 1992. *Fisiología vegetal*. Ed. Iberoamérica. pp. 149-151.
- Santiago L, Kitajima K, Wright S, Mulkey S. 2004. Coordinated changes in photosynthesis, water relations and leaf nutritional traits of canopy trees along a precipitation gradient in lowland tropical forest. *Oecologia* 139(4):495-502.
- Sardans J, Rivas A, Peñuelas J. 2011. Factors affecting nutrient concentration and stoichiometry of forest trees in Catalonia (NE Spain). *Forest Ecology and Management* 262:2024–2034.

- Segura M, Castillo A, Alvarado A, Blanco F. 2005. Extracción de nutrimentos en plantaciones de jaúl (*Alnus acuminata*) en la cuenca del río Virilla, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(2):109-120.
- Stanley W, Montagnini F. 1999. Biomass and nutrient accumulation in pure and mixed plantations of indigenous tree species grown on poor soils in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 113(1):91-103.
- Styles B. 1981. Swietenioideae. In Pennington. Styles B, Taylor D (eds.). *Flora Neotropica*. Monograph 28:359-394.
- Switzer G, Nelson L, Smith W. 1968. The mineral cycle in forest stands. In: *Forest Fertilization theory and practice. Papers presented at the Symposium on Forest Fertilization at Gainesville, Florida*. Tennessee Valley Authority, National Fertilizer Development Center. Muscle Shoals, Alabama. pp. 1-9.
- Thiers O, Gerding V, Schllater J. 2007. Exportación de nitrógeno y calcio mediante raleo en un rodal de *Eucalyptus nitens* de 5 años de edad, Chile. *Bosque* 28(3):256-262.
- Timyan J. 1996. BWA YO: Important tree of Haiti. SECID. Washington. USA. pp. 63-70.
- Townsend A, Cleveland C, Asner G, Bustamante M. 2007. Controls over foliar N:P ratios in tropical rain forests. *Ecology* 88(1):107-118.
- Vega L. 1974. Influencia de la silvicultura sobre el comportamiento de *Cedrela* en Surinam. Instituto Forestal Latinoamericano de Investigación y Capacitación. 46-48 pp
- Viera C, Pineda A. 2004. Productividad de un lindero maderable de *Cedrela odorata*. *Agronomía Mesoamericana* 5(1):85-92.
- Vitousek PM, Sandfor RL. 1984. Nutrient cycling in moist tropical forest. *Annual Review of Ecology and Systematics* 17:137-167.

- Webb M, Reddell P, Grundon NJ. 2001. A visual guide to nutritional disorders of tropical timber species: *Swietenia macrophylla* and *Cedrela odorata*. Canberra, Australia. 178 p. ACIAR Monograph, No. 61.
- Webb M., Reddell P, Hambleton A, Robson K. 2000. Growth response of four tropical plantation timber species to increasing phosphorus supply and assessment of phosphorus requirements using foliar analysis. *New Forests* 20(2):193-211.
- Wessmann C, Aber J, Peterson D. 1989. An evaluation of imaging spectrometry for estimating forest canopy chemistry. *International Journal of Remote Sensing*. 10:1293–1316.
- Wimmer R, Lucas B. 1997. Comparing mechanical properties of secondary wall and cell corner middle lamella in spruce wood. *IAWA Journal* 18:77–78.
- Worbes M. 1999. Annual growth rings, rainfall-dependent growth and long-term growth pattern of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. *Journal of Ecology* 87:391-403.
- Wu C, Tsui C, Hsieh C, Asio V, Chen Z. 2007. Mineral nutrient status of tree species in relation to environmental factors in the subtropical rain forest of Taiwan. *Forest Ecology and Management* 239:81–91.
- Yamada M, Gholz, H. 2002. Growth and yield of some indigenous trees in an Amazonian agroforestry system: rural-history-based analysis. *Agroforestry Systems* 55(1):17-26.
- Yamada M, Toma T, Hiratsuka M, Morikawa Y. 2004. Biomass and potential nutrient removal by harvesting in short-rotation plantations. En: "Site Management and Productivity in Tropical Plantation Forests". Ed. Nambiar E, Ranger J Tiarks A. CIFOR 14 p.

Zech W, Drechsel P. 1992. Multiple mineral deficiencies in forest plantations in Liberia. *Forest Ecology and Management* 48:121-143.