

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
*Escuela de Ingeniería Forestal*

Informe Final de Proyecto de Investigación

**Vicerrectoría de investigación y extensión**

**Caracterización de la distribución de la biomasa y densidad de raíces finas en un gradiente sucesional de bosques en la Zona Norte de Costa Rica**

**César Jiménez Rodríguez**



**Octubre, 2004**

## Caracterización de la distribución de la biomasa y densidad de raíces finas en un gradiente sucesional de bosques en la Zona Norte de Costa Rica

César Jiménez Rodríguez

### RESUMEN

En este estudio se evaluó la distribución de la biomasa radical, el índice de área radical (RAI) y la densidad longitudinal (RLD) de raíces finas ( $< 5$  mm) en una gradiente sucesional de bosques húmedos tropicales en la zona de Florencia de San Carlos, Costa Rica. La variación de estos parámetros se evaluaron en función de la profundidad del suelo y del estado sucesional. La biomasa radical al igual que el RAI y el RLD disminuyen conforme aumenta la profundidad en el perfil y coincide con los cambios en las propiedades físicas del suelo evaluadas. La acumulación de biomasa varía en los diferentes estados sucesionales, siendo el bosque secundario de 24 años el que presenta mayor biomasa radical ( $440.62 \text{ g/m}^2$ ) y los pastos los de menor acumulación ( $74.62 \text{ g/m}^2$ ). Sin embargo, no se encontró una tendencia definida que explique los cambios en las características radicales evaluadas con respecto al estado sucesional. Lo anterior pone en evidencia que existe un fuerte efecto de la calidad del sitio. Variaciones de la biomasa radical en el perfil del suelo se deben principalmente a características topográficas, aumento del porcentaje de arena y disminución de la densidad real en algunos horizontes del suelo. La utilización de variables obtenidas a partir del estudio de raíces finas podrían jugar un papel muy importante para caracterizar la productividad de estos bosques.

**Palabras clave:** Bosque secundario, Raíces finas, Biomasa radical, Índice de área radical, Densidad longitudinal, Suelos, Costa Rica, Bosque húmedo tropical.

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo agradecer a mi familia y personas cercanas que me brindaron todo su apoyo en la realización de este proyecto

A mi profesor asesor Dr. Dagoberto Arias Aguilar por todo el apoyo y ayuda brindado a lo largo de estos meses.

A la investigadora de la Universidad de Costa Rica, M. Sc. Ana Tapia por las facilidades brindadas.

A todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Forestal su ayuda y apoyo.

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por el apoyo financiero para la realización de este estudio.

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>3</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	<b>5</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>6</b>
1.2 <i>Objetivos</i> .....	7
1.2.1 <i>Objetivo General</i> .....	7
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	7
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>7</b>
2.1 <i>Los bosques secundarios tropicales</i> .....	7
2.1.1 <i>Funciones de los bosques secundarios</i> .....	8
2.2 <i>Estudios de raíces en bosques secundarios</i> .....	9
<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>16</b>
3.1 <i>Sitio de Estudio</i> .....	16
3.2 <i>Muestreo</i> .....	17
3.3 <i>Análisis</i> .....	18
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>19</b>
4.1 <i>Biomasa radical</i> .....	19
4.1.1 <i>Variación de la Biomasa en función de la profundidad</i> .....	19
4.1.2 <i>Variación de la Biomasa en función del estado sucesional</i> .....	23
4.2 <i>Parámetros Radicales</i> .....	26
4.2.1 <i>Variación del índice de área radical &lt;RAI&gt; en función del estado sucesional</i> ....	26
4.2.2 <i>Variación de la densidad lineal &lt;RLD&gt; en función del estado sucesional</i> .....	27
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>29</b>
<b>APORTES Y ALCANCES</b> .....	<b>31</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>32</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>35</b>
<b>DOCUMENTO II</b> .....	<b>38</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>CUADRO 1.</b> VARIACIÓN DE LA BIOMASA DE RAÍCES FINAS EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD, DIÁMETRO DE RAÍCES Y EDAD DE LA VEGETACIÓN EN DIFERENTES ECOSISTEMAS DEL MUNDO.....	12
<b>CUADRO 2.</b> VARIACIÓN DE LA BIOMASA RADICAL, ÍNDICE DE ÁREA RADICAL Y DENSIDAD LINEAL EN FUNCIÓN DEL SITIO DE MUESTREO. FLORENCIA, ALAJUELA, COSTA RICA. 2004.....	37
<b>CUADRO 3.</b> VARIACIÓN DE LAS PRINCIPALES PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN FUNCIÓN DEL SITIO Y PROFUNDIDAD DE MUESTREO. FLORENCIA, ALAJUELA, COSTA RICA. 2004.....	37

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> MAPA DE UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO. FLORENCIA, ALAJUELA, COSTA RICA. 2004. ....	17
<b>FIGURA 2.</b> LAVADO Y SEPARACIÓN DE RAICES (A). RESIDUOS Y RAICES DE CADA MUESTRA (B).....	18
<b>FIGURA 3.</b> DESCRIPCIÓN DE LOS GRÁFICOS “BOXPLOT” UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS DE RESULTADOS. A) MEDIANA; B) VALOR MÁXIMO, C) VALOR MÍNIMO, D) PRIMER CUARTIL DEL VALOR MÁXIMO Y E) PRIMER CUARTIL DEL VALOR MÍNIMO.....	19
<b>FIGURA 4.</b> VARIACIÓN DE LA BIOMASA DE RAÍCES FINAS (<5 MM) EN FUNCIÓN DEL TIPO DE COBERTURA Y PROFUNDIDAD DE MUESTREO. FLORENCIA, ALAJUELA, COSTA RICA. 2004. A) PASTOS; B) BOSQUE SECUNDARIO DE 12 AÑOS; C) BOSQUE SECUNDARIO DE 24 AÑOS; D) BOSQUE SECUNDARIO DE 31 AÑOS; E) BOSQUE PRIMARIO. ....	21
<b>FIGURA 5.</b> VARIACIÓN DE LA BIOMASA RADICAL Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL SUELO EN FUNCIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE MUESTREO EN EL BOSQUE SECUNDARIO DE 24 AÑOS DE EDAD EN DIFERENTES CALICATAS....	23
<b>FIGURA 6.</b> VARIACIÓN DE LA BIOMASA RADICAL EN FUNCIÓN DEL SITIO. A) ANÁLISIS DE LA BIOMASA HASTA 1 M DE PROFUNDIDAD Y B) ANÁLISIS DE LA BIOMASA HASTA LOS 20 CM DE PROFUNDIDAD. FLORENCIA, ALAJUELA, COSTA RICA. 2004. ....	25
<b>FIGURA 7.</b> VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA RADICAL (RAI) EN FUNCIÓN DEL SITIO. A) ANÁLISIS DEL RAI HASTA 1 M DE PROFUNDIDAD Y B) ANÁLISIS DEL RAI HASTA LOS 20 CM DE PROFUNDIDAD. FLORENCIA, ALAJUELA, COSTA RICA. 2004. ....	27
<b>FIGURA 8.</b> VARIACIÓN DE LA DENSIDAD LINEAL (RLD) EN FUNCIÓN DEL SITIO. A) ANÁLISIS DE LA DENSIDAD LINEAL TOTAL Y B) ANÁLISIS DE LA DENSIDAD LINEAL HASTA LOS 20 CM DE PROFUNDIDAD. FLORENCIA, ALAJUELA, COSTA RICA. 2004. ....	28
<b>FIGURA 9.</b> VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE ÁREA RADICAL DE RAÍCES FINAS (<5 MM) EN FUNCIÓN DEL TIPO DE COBERTURA Y PROFUNDIDAD DE MUESTREO. FLORENCIA, ALAJUELA, COSTA RICA. 2004. A) PASTOS; B) BOSQUE SECUNDARIO DE 12 AÑOS; C) BOSQUE SECUNDARIO DE 24 AÑOS; D) BOSQUE SECUNDARIO DE 31 AÑOS; E) BOSQUE PRIMARIO35	
<b>FIGURA 10.</b> VARIACIÓN DE LA DENSIDAD LONGITUDINAL (RLD) DE RAÍCES FINAS (<5 MM) EN FUNCIÓN DEL TIPO DE COBERTURA Y PROFUNDIDAD DE MUESTREO. FLORENCIA, ALAJUELA, COSTA RICA. 2004. A) PASTOS; B) BOSQUE SECUNDARIO DE 12 AÑOS; C) BOSQUE SECUNDARIO DE 24 AÑOS; D) BOSQUE SECUNDARIO DE 31 AÑOS; E) BOSQUE PRIMARIO.....	36

## INTRODUCCIÓN

Los bosques húmedos de Costa Rica se han caracterizado por una exuberante biodiversidad y han sido utilizados tradicionalmente para la obtención de productos forestales, así como medicinas y alimentos. Pero además han generado una serie de servicios ambientales que hasta recientemente han sido valorados por la sociedad costarricense. La utilización excesiva del recurso maderero, en durante las últimas 4 décadas ha conllevado a la disminución en el área de cobertura por bosque. Este cambio en el uso del suelo ha provocado serios problemas y trastornos en el suelo debido a la erosión, la pérdida de nutrientes, la compactación y en general la pérdida de la riqueza biológica

La legislación forestal costarricense no permite la eliminación de los bosques y se incentiva la recuperación de aquellas áreas de vocación forestal. Adicionalmente los trastornos ocasionados por actividades como la ganadería han propiciado un aumento del área de cobertura de sucesión natural denominada como bosques secundarios. El desarrollo de los bosques secundarios húmedos en Costa Rica, coincidió con la eliminación del bosque natural para el establecimiento de actividades agropecuarias y su posterior abandono. La mayoría de estos bosques secundarios iniciaron su etapa de sucesión sobre suelos con diferentes grados de degradación tanto por factores físicos y químicos como biológicos.

El principal enfoque de los estudios realizados en bosques secundarios se ha centrado en la caracterización de la dinámica de la sucesión y de la estructura vertical y horizontal; no obstante, un factor importante en el desarrollo de los bosques secundarios y que ha sido poco estudiado son las raíces de la vegetación y su rol en el sostén y absorción de nutrimentos por parte de las plantas (Morales, 1997).

En los bosques secundarios húmedos de Costa Rica, después de la eliminación del bosque para el establecimiento de actividades económicas (agricultura y ganadería) y su abandono han provocado la disminución de la calidad del suelo en términos físicos y químicos. Alfaro et al (2001) mencionan la variación de las propiedades químicas del suelo cuando se pasa de una cobertura arbórea a pastizales debido a la pérdida del mantillo; mientras que otros autores se refieren a la variación de la propiedades físicas del suelo.

La relación íntima entre el suelo y las plantas viene dada por la presencia de las raíces como órganos de anclaje y absorción de nutrientes, y por medio de su estudio se pueden establecer relaciones entre las necesidades fisiológicas de las plantas y el efecto que tienen ellas sobre el suelo, además, de la relación existente entre las propiedades del suelo sobre el desarrollo de las raíces.

Morales (1997) menciona la importancia del estudio de las raíces finas dentro de sistemas simultáneos debido a que en ellos ocurren interacciones entre diversas especies por medio de la competencia en la adquisición de nutrientes y agua, además, el desarrollo de estudios de raíces en bosques secundarios de diversas edades en función de las características de los suelos ayudaría a

comprender el papel que juegan los factores de sitio en la dinámica de los bosques, logrando justificar posibles mejoras en los sistemas de manejo forestal existentes.

El presente estudio intenta conocer las relaciones existentes entre las propiedades físicas del suelo y las raíces finas, además, del comportamiento que se establece entre estos sistemas y la variación entre coberturas.

## **1.2 Objetivos**

### *1.2.1 Objetivo General*

- ✓ Caracterizar la distribución de la biomasa y la densidad de raíces finas en función de las características físicas del suelo y el estado sucesional del bosque.

### *1.2.2 Objetivos específicos*

- ✓ Analizar la variación de la biomasa y densidad de raíces en diferentes profundidades de muestreo y en función de las características físicas del suelo.
- ✓ Analizar la relación existente entre las raíces y la etapa de sucesión del bosque
- ✓ Evaluar técnicas para el análisis de raíces finas basado en el procesamiento de imágenes digitales, microscopio de captura de imágenes e indicadores de reducción bioquímica

## **MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Los bosques secundarios tropicales**

Los bosques secundarios tropicales se desarrollan de forma natural mediante las sucesiones secundarias en tierras que han sido abandonadas después de un cultivo migratorio, asentamiento de la agricultura, por la deforestación o fracasos de plantaciones de árboles y como resultado de una catástrofe natural como incendios, deslizamientos e inundaciones (COSEFORMA, 1999; Müller, 2002; Mena, 2002).

Smith et al (1997), definen la sucesión secundaria como “el proceso caracterizado por cambios que se suceden en el ecosistema después de una perturbación natural o humana”; dichos cambios son reconocibles en etapas las cuales diversos autores han descrito y estudiado detalladamente, no obstante cada bosque secundario difiere de los demás en sus características fitogeográficas e históricas (uso anterior de la tierra, intervenciones durante el desarrollo, etc), que provocan diferencias significativas entre dichas áreas boscosas.

Dado que la sucesión secundaria es un proceso dinámico y poco predecible; se ha logrado caracterizarla mediante etapas que difieren principalmente en edad, vegetación y las variaciones en el desarrollo químico del suelo (Alfaro et al, 2001; COSEFORMA, 1999).

Es importante resaltar el hecho que los bosques secundarios no presentan límites estrictos entre las diferentes edades, y que para su clasificación es importante determinar las características clave que logran diferenciar a los ecosistemas en términos evolutivos.

Por ejemplo, en un estudio sobre los Bosques Montanos de Costa Rica se realizó la diferenciación entre etapas sucesionales por medio de la edad que presenta el ecosistema después de su última intervención (Hertel et al, 2003); en el Bosque Seco Tropical se realizó tomando como etapa inicial un área de pasto y como etapas superiores dos Bosques Secos de diferentes edades (Alfaro et al; 2001), mientras que en el Bosque Húmedo Tropical se han utilizado las comparaciones entre bosques secundarios de diversas edades y bosques primarios (Berish, 1982; Raich, 1983)

#### *Primera etapa*

Esta etapa abarca los tres primeros años después del abandono de las actividades que se realizaban en el sitio, se caracteriza principalmente por la presencia de plantas herbáceas, bejucos y arbustos; las plantas heliófitas de rápido crecimiento colonizan el sitio y aumentan poco a poco la altura del dosel (COSEFORMA, 1999; Müller, 2002; Smith et al, 1997).

#### *Segunda etapa*

Corresponde desde los primeros 2 ó 3 años hasta los 12 ó 18 años. Presenta un dominio de las especies forestales de rápido crecimiento que desplazan poco a poco a las plantas herbáceas por la competencia por la luz, la mayoría de las especies comerciales crecen lentamente bajo la sombra de las especies pioneras (COSEFORMA, 1999; Müller, 2002; Smith et al, 1997).

#### *Tercera etapa*

Es la etapa de mayor edad abarca de los 18 años en adelante. Estos bosques presentan un dosel alto, dominado por las especies heliófitas durables de interés comercial, una menor cantidad de sotobosque y una diferenciación entre los diversos estratos, además se empiezan a presentar especies de esciófitas que crecen a la sombra de las heliófitas durables (COSEFORMA, 1999; Müller, 2002; Smith et al, 1997).

##### *2.1.1 Funciones de los bosques secundarios*

Tomando en cuenta la cantidad de bosques secundarios que existen en el país, es importante resaltar las diversas funciones que estos tienen para el desarrollo económico y social.

Los bosques secundarios proveen beneficios económicos derivados del pago por servicios ambientales, productos maderables y no maderables del bosque, beneficios ecológicos como la fijación de carbono (CO<sub>2</sub>), protección del agua y del suelo, mantenimiento de la biodiversidad,



entre otros. La importancia de estos bosques en el contexto nacional, ha despertado el interés de diversos investigadores en comprender la dinámica y función de dichas áreas (Quirós, 1999).

La fijación de carbono es uno de los temas más actuales debido a su importancia en el mejoramiento de la calidad del ambiente como mecanismo de mitigación del efecto de invernadero. Mundialmente se han desarrollado estudios que incorporan información de la biomasa fijada por los bosques (primarios y secundarios), además del aporte de las plantaciones forestales; no obstante, todas estas investigaciones delimitan sus observaciones en la biomasa aérea de los ecosistemas, sin tomar en cuenta, parcial o totalmente la biomasa que existe debajo del suelo fijada por medio de los sistemas radicales de los árboles, subestimando la totalidad de la biomasa acumulada en los ecosistemas ya que algunos autores mencionan que la biomasa radical aporta entre un 10% a un 50% de la biomasa total de un ecosistema (Jackson et al, 1997; Sierra et al, 2001).

## **2.2 Estudios de raíces en bosques secundarios**

El enfoque de diversos estudios sobre bosques secundarios en los trópicos, se ha centrado en la caracterización de la dinámica de la sucesión, estructura vertical y horizontal. No obstante, un factor importante en el desarrollo de los bosques secundarios y que ha sido poco estudiado es la función de las raíces de la vegetación y su importancia en el sostén, absorción de nutrimentos y reservas de energía, entre otros (Morales, 1997).

La estrecha relación entre el suelo y las plantas se da por la presencia de las raíces como órganos de anclaje y absorción de nutrientes. Por medio de su estudio se pueden establecer relaciones entre las necesidades fisiológicas de las plantas y el efecto que ocasionan sobre el suelo, así como la relación existente entre las propiedades del suelo y el desarrollo de las raíces.

Morales (1997), menciona que el estudio de las raíces finas dentro de sistemas simultáneos (sitios en los cuales se relacionan muchas especies durante un lapso de tiempo) es importante debido a que en ellos ocurren interacciones entre las diversas especies. Aquí se incluye la competencia en la adquisición de nutrientes y agua por individuos de la misma especie u otras diferentes. En este sentido los estudios de raíces en bosques secundarios que consideren diversas edades y características de los suelos, ayudaría a comprender el papel que juegan los factores de sitio en la dinámica y productividad de los bosques, logrando justificar posibles mejoras en los sistemas de manejo forestal existentes.

El sistema radical está conformado por las raíces que son una de las estructuras más importantes de la planta, ya que cumplen diferentes funciones tanto en el sostén estructural para el árbol, como en la extracción de nutrientes del suelo, órgano de reserva de nutrientes y el encargado de la regulación fisiológica de la planta así como fijador de carbono (Arnáez, 2002; Jensen, 1994; Morales, 1997), mientras que ambientalmente ayudan en la aireación del suelo y en el flujo de nutrientes del medio en el que la planta se desenvuelve (Flores, 1999).

Las funciones de las raíces están relacionadas con los tejidos que las conforman, el tamaño y características morfológicas de las mismas. El sostén, la conducción de nutrientes y la mayor parte de la fijación de carbono debajo del suelo está a cargo de las raíces que presentan principalmente tejido secundario, mientras que la absorción de nutrientes y del agua están relacionadas con las raíces que presentan tejido primario; estas últimas son comúnmente denominadas raíces finas y se han caracterizado por ser una de las estructuras más dinámicas y activas de la planta (Flores, 1999; Jensen, 1994).

La diferenciación de las raíces “finas” de las “gruesas” es muy difícil y se han propuesto diversas maneras para hacerlo. Uno de los procedimientos más utilizados ha sido la discriminación por medio del diámetro de las raíces usando como parámetros los límites superiores de 2 mm o 5 mm, según sea el objetivo del estudio.

Esta diferenciación se debe principalmente a que las raíces que conforman estas categorías presentan en su superficie tricoblastos que son las estructuras encargadas de la absorción de nutrientes y del agua del suelo por parte de la planta (Flores, 1999; Jensen, 1994).

Dado que las raíces se desarrollan en sistemas radiculares que varían en longitud, área y función, dependiendo de las especies involucrados y las características ambientales que se presenten en un determinado sitio; se ha visto la necesidad de analizar las raíces por medio de diversos parámetros que faciliten su comprensión, a saber: la densidad de la biomasa de raíces finas ( $g/m^2$ ), el índice de área radical ( $m^2/m^2$ , RAI por sus siglas en inglés), la densidad radical longitudinal ( $m/m^2$ , RLD por sus siglas en inglés) y la densidad volumétrica ( $m^3/m^2$ ), entre los más comunes.

La biomasa radical es un parámetro que expresa la cantidad de biomasa (gramos de materia seca), en una unidad de área determinada en la profundidad de muestreo ( $g/m^2$ ), por lo que se puede tomar como parámetro para estimar la fijación de carbono en el ecosistema. La densidad lineal ( $m/m^2$ , RLD) es una variable que emplea el valor en longitud de las raíces analizadas, expresándolas en una unidad de área específica, por lo que se relaciona en la aireación del suelo y la conducción de agua y nutrientes después de la muerte de estas pequeñas estructuras (Morales, 1997). El índice de área radical (RAI) que utiliza los valores de largo (mm) y diámetro (mm) de raíces para determinar el área superficial que tiene contacto con el suelo, y la relaciona estrechamente con la absorción de nutrientes, debido a que cuanto mayor sea el área radical mayor serán los tricoblastos que absorben nutrientes del suelo. Todas estas variables han sido directamente relacionadas con la obtención de agua y nutrientes del suelo, debido a que logran expresar de una manera muy sencilla la cantidad de raíces encargadas de la obtención de nutrientes en los sitios estudiados (Morales, 1997; Hertel et al, 2003; Jackson et al, 1997).

Hertel (2003), usó el valor de biomasa de raíces finas ( $g/m^2$ ) y encontró que en bosques tropicales montanos en Costa Rica, existe una variación entre el valor de biomasa radical de bosques secundarios y bosques maduros, con una tendencia a crecer conforme aumenta la edad del estrato, debido principalmente a las especies presentes en el bosque y a la edad del mismo; mientras que Vanninen y Mäkelä (1999) encontraron diferencias de la biomasa en bosques templados de *Pinus sylvestris* de diferentes edades en Finlandia, al aumentar la biomasa radical conforme aumenta la edad del bosque.

En la Estación Biológica La Selva en Costa Rica, Raich (1983) analizó el componente de biomasa radical en los bosques húmedos de esa región, y encontró una diferencia poco significativa entre los valores de biomasa entre el bosque secundario y el bosque primario; no obstante, existe una diferencia muy marcada en la fijación de carbono, lo cual lleva a suponer que el tipo de especies presentes en el área influyen en la fijación de este gas.

Jackson *et al* (1997) y Raich (1983), describen el comportamiento de la biomasa radical conforme se disminuye la profundidad y demuestran un comportamiento exponencial conforme se avanza verticalmente, dando una idea sobre los coeficientes de extinción de raíces.

Deans *et al* (1996), llevaron a cabo en Camerún una investigación sobre el comportamiento de la biomasa radical en bosques secundarios y un bosque primario, se determina que los bosques secundarios con edades de 30 años mantienen una biomasa similar a la de los bosques primarios. Esta conclusión guarda mucha relación con los resultados obtenidos por Sierra *et al* (2001) en Colombia. Deans *et al* (1996) también evaluó el comportamiento de las raíces en relación con la profundidad del suelo, y se comprueba al igual que Jackson *et al* (1997), Raich (1983) y Morales (1997) el comportamiento exponencial de disminución de la biomasa con la profundidad.

Fujita y Yanagisawa (1999) elaboraron en Japón un estudio sobre el comportamiento vertical de las raíces de tres especies forestales (*Quercus serrata*, *Q. glauca* y *Styrax japonica*), donde se determina claramente el comportamiento de reducción de la biomasa radical en relación con la profundidad, atribuida principalmente a la baja capacidad de obtención de agua en profundidades mayores a los 40 cm por parte de las raíces de los árboles.

En el Cuadro 1 se presenta una revisión de los valores sobre biomasa de raíces en diferentes ecosistemas.

**Cuadro 1.** Variación de la biomasa de raíces finas en función de la profundidad, diámetro de raíces y edad de la vegetación en diferentes ecosistemas del mundo.

Ecosistema	Edad años	Diámetro ( mm )	Biomasa ( g/m <sup>2</sup> )	Profundidad ( cm )	Ubicación	Fuente bibliográfica
<b>Ecosistemas Tropicales</b>						
Bosque húmedo primario	n.d.	0 - 5	783	1 - 50	Sarapiquí, Costa Rica	(Raich, 1983)
Bosque húmedo secundario	11	0 - 5	385	1 - 50	Sarapiquí, Costa Rica	(Raich, 1983)
Bosque montano secundario	15	0 - 2	31	1 - 10	Talamanca, Costa Rica	(Hertel et al; 2003)
Bosque montano secundario	40	0 - 2	337	1 - 10	Talamanca, Costa Rica	(Hertel et al; 2003)
Bosque montano primario	n.d.	0 - 2	1128	1 - 10	Talamanca, Costa Rica	(Hertel et al; 2003)
Bosque premontano-tropical primario	n.d.	0 - 5	5478.6	1 - 100	Cordillera de los Andes, Colombia	(Sierra et al, 2001)
Bosque premontano-tropical secundario	---	0 - 5	2036.9	1 - 100	Cordillera de los Andes, Colombia	(Sierra et al, 2001)
Plantación abandonada de <i>Alnus acuminata</i>	26	0 - 5	160	1 - 20	Cordillera de los Andes, Colombia	(Cavelier y Santos, 1999)
Plantación abandonada de <i>Cupressus lusitanica</i>	26	0 - 5	1530	1 - 20	Cordillera de los Andes, Colombia	(Cavelier y Santos, 1999)
Plantación abandonada de <i>Eucalyptus grandis</i>	26	0 - 5	170	1 - 20	Cordillera de los Andes, Colombia	(Cavelier y Santos, 1999)
Plantación abandonada de <i>Pinus radiata</i>	26	0 - 5	210	1 - 20	Cordillera de los Andes, Colombia	(Cavelier y Santos, 1999)
Bosque montano secundario	26	0 - 5	720	1 - 20	Cordillera de los Andes, Colombia	(Cavelier y Santos, 1999)
Pastizales	n.d.	0 - 5	890	1 - 20	Cordillera de los Andes, Colombia	(Cavelier y Santos, 1999)
Bosques siempreverdes secos	n.d.	0 - 2*	203	---	Costa Coromandel, India	(Visalakshi, 1994)
Bosques siempreverdes secos	n.d.	0 - 2*	359	---	Costa Coromandel, India (Puthupet)	(Visalakshi, 1994)

<b>Ecosistema</b>	<b>Edad años</b>	<b>Diámetro ( mm )</b>	<b>Biomasa ( g/m2 )</b>	<b>Profundidad ( cm )</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Fuente bibliográfica</b>
Bosque húmedo secundario natural	n.d.	0 - 1	800	1 - 85	Turrialba, Costa Rica	(Berish, 1988)
Bosque húmedo secundario enriquecido con semillas	n.d.	0 - 1	1370	1 - 85	Turrialba, Costa Rica	(Berish, 1988)
Imitación de Bosque húmedo secundario	n.d.	0 - 1	1530	1 - 85	Turrialba, Costa Rica	(Berish, 1988)
Plantación de <i>Cordia alliodora</i>	3.5	0 - 1	1000	1 - 85	Turrialba, Costa Rica	(Berish, 1988)
Bosque premontano primario	n.d.	0 - 2	180	1 - 50	Sarapiquí, Costa Rica	(Raich, 1980)
Bosque Premontano secundario	5	0 - 2	179	1 - 50	Sarapiquí, Costa Rica	(Raich, 1980)
Bosque húmedo secundario	1	0 - 5	219	1 - 85	Turrialba, Costa Rica	(Berish, 1982)
Bosque húmedo secundario	8	0 - 5	1291	1 - 85	Turrialba, Costa Rica	(Berish, 1982)
Bosque húmedo secundario	70	0 - 5	1555	1 - 85	Turrialba, Costa Rica	(Berish, 1982)
Bosque semideciduo	2	0 - 10	250	1 - 20	Mbalmayo, Camerún	(Deans et al, 1996)
Bosque semideciduo	7	0 - 10	325	1 - 20	Mbalmayo, Camerún	(Deans et al, 1996)
Bosque semideciduo	12	0 - 10	400	1 - 20	Mbalmayo, Camerún	(Deans et al, 1996)
Bosque semideciduo	30	0 - 10	900	1 - 20	Mbalmayo, Camerún	(Deans et al, 1996)
Bosque semideciduo	100	0 - 10	700*	1 - 20	Mbalmayo, Camerún	(Deans et al, 1996)
Bosque semideciduo	n.d.	0 - 2	370 - 1040	1 - 10	Ghana	(Baker, 2003)
Bosque semideciduo	n.d.	0 - 2	2.5	30 - 40	Ghana	(Baker, 2003)
Bosque húmedo	20	0 - 2	550	--	Las Tuxtlas, México	(Flint, 1999)
Bosque húmedo	30	0 - 2	2250	--	Las Tuxtlas, México	(Flint, 1999)
Plantación de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	3	--	12 kg*	1 - 100	Norte de Australia	(Sun & Dickinson; 1995)
Plantación de <i>Casuarina cunninghamiana</i>	3	--	5.5 kg*	1 - 100	Norte de Australia	(Sun & Dickinson; 1995)
Bosque húmedo	--	0 - 2*	404	0 - 20	Barro Colorado, Panamá	(Becker et al; 1999)
Bosque húmedo	--	0 - 2*	247	0 - 20	Pasoh, Malasia	(Becker et al; 1999)
Bosque húmedo	--	0 - 2*	264	0 - 20	Andulau, Brunei	(Becker et al; 1999)

Ecosistema	Edad años	Diámetro ( mm )	Biomasa ( g/m <sup>2</sup> )	Profundidad ( cm )	Ubicación	Fuente bibliográfica
<b>Ecosistemas subtropicales</b>						
Bosque húmedo secundario	7	0 - 2	815.83*	0 - 10	Shillong, India	(Arunachalam et al, 1996)
Bosque húmedo secundario	13	0 - 2	852.54*	0 - 10	Shillong, India	(Arunachalam et al, 1996)
Bosque húmedo secundario	16	0 - 2	855.97*	0 - 10	Shillong, India	(Arunachalam et al, 1996)
continua en la próxima página .....						
Bosque de <i>Pinus kesiya</i> ( understory )	22	0 - 2	291	0 - 10	Shillong, India	(Arunachalam et al, 1996)
Bosque de <i>Pinus kesiya</i> ( gap )	22	0 - 2	237	0 - 10	Shillong, India	(Arunachalam et al, 1996)
Bosque de <i>Pinus kesiya</i> ( cut-tree stand )	22	0 - 2	319	0 - 10	Shillong, India	(Arunachalam et al, 1996)
Bosque de <i>Pinus kesiya</i> ( soil heap )	22	0 - 2	160	0 - 10	Shillong, India	(Arunachalam et al, 1996)
<b>Ecosistemas templados</b>						
Bosques de <i>Pinus silvestris</i>	23	0 - 5	1841	1 - 15	Finlandia	(Vanninen & Mäkelä; 1999)
Bosques de <i>Pinus silvestris</i>	38	0 - 5	3703	1 - 41	Finlandia	(Vanninen & Mäkelä; 1999)
Bosques de <i>Pinus silvestris</i>	78	0 - 5	4320	1 - 36	Finlandia	(Vanninen & Mäkelä; 1999)
Bosques de <i>Pinus silvestris</i>	178	0 - 5	3019	1 - 32	Finlandia	(Vanninen & Mäkelä; 1999)
Bosques de <i>Pinus silvestris</i>	15	0 - 5	2775	1 - 43	Finlandia	(Vanninen & Mäkelä; 1999)
Bosques de <i>Pinus silvestris</i>	43	0 - 5	2564	1 - 34	Finlandia	(Vanninen & Mäkelä; 1999)
Bosques de <i>Pinus silvestris</i>	83	0 - 5	2715	1 - 42	Finlandia	(Vanninen & Mäkelä; 1999)
Bosque de <i>Picea abies</i> , sin raleo	47 - 51	0 - 10	62.8	--	Tisted Noerskov, Dinamarca	(Vesterdal et al, 1995)
Bosque de <i>Picea abies</i> , con 17 % área basal raleada	47 - 51	0 - 10	38.6	--	Tisted Noerskov, Dinamarca	(Vesterdal et al, 1995)
Bosque de <i>Picea abies</i> , con 33 % área basal raleada	47 - 51	0 - 10	11.9	--	Tisted Noerskov, Dinamarca	(Vesterdal et al, 1995)
Bosque de <i>Picea abies</i> , con 50 % área basal raleada	47 - 51	0 - 10	7.4	--	Tisted Noerskov, Dinamarca	(Vesterdal et al, 1995)
Bosque de <i>Picea abies</i> , sin raleo	47 - 51	0 - 10	278.5	--	Store Dyrehave, Dinamarca	(Vesterdal et al, 1995)
Bosque de <i>Picea abies</i> , con 17 % área basal raleada	47 - 51	0 - 10	329.2	--	Store Dyrehave, Dinamarca	(Vesterdal et al, 1995)
Bosque de <i>Picea abies</i> , con 33 % área basal raleada	47 - 51	0 - 10	268.5	--	Store Dyrehave, Dinamarca	(Vesterdal et al, 1995)

<b>Ecosistema</b>	<b>Edad años</b>	<b>Diámetro ( mm )</b>	<b>Biomasa ( g/m2 )</b>	<b>Profundidad ( cm )</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Fuente bibliográfica</b>
Bosque de <i>Picea abies</i> , con 50 % área basal raleada	47 - 51	0 - 10	173.9	--	Store Dyrehave, Dinamarca	(Vesterdal et al, 1995)

Nota: n.d. = edad no determinada del bosque.

---- = dato no disponible en la fuente.

\* = valor determinado por medio de información general del documento.

## METODOLOGÍA

### 3.1 Sitio de Estudio

La investigación se desarrolló en un gradiente sucesional de bosques ubicados en la Zona Norte de Costa Rica. Este gradiente está tipificado por cinco condiciones de sitio, cuya diferencia radica en las etapas sucesionales que abarcan desde áreas con pasto, bosque secundario y bosque primario.

El área de estudio se localiza en la sede regional del Instituto Tecnológico de Costa Rica (Santa Clara), en el distrito Florencia del cantón de San Carlos, Alajuela, dentro de la zona de vida Bosque muy Húmedo Premontano, con una precipitación media anual de 4000 mm y suelos del orden Inceptisoles (Ortiz, 2000; Mena, 2002; Quirós, 1999).

Los muestreos de raíces y suelos se realizaron en dos sectores relativamente cercanos bajo las mismas condiciones bioclimáticas (Figura 1). El primer sector representa las etapas sucesionales tempranas, conformado por un área de pastos (etapa inicial), bosque secundario de 12 años y un bosque secundario de 24 años denominado “La Esmeralda”. Estos sitios presentan una topografía plana sin mucha variación en las pendientes del terreno.

El área de pastos actualmente es dedicada al pastoreo de ganado de leche; la superficie está cubierta por una vegetación dominada principalmente por gramíneas y está sujeta a la compactación del suelo por la continua presencia de ganado.

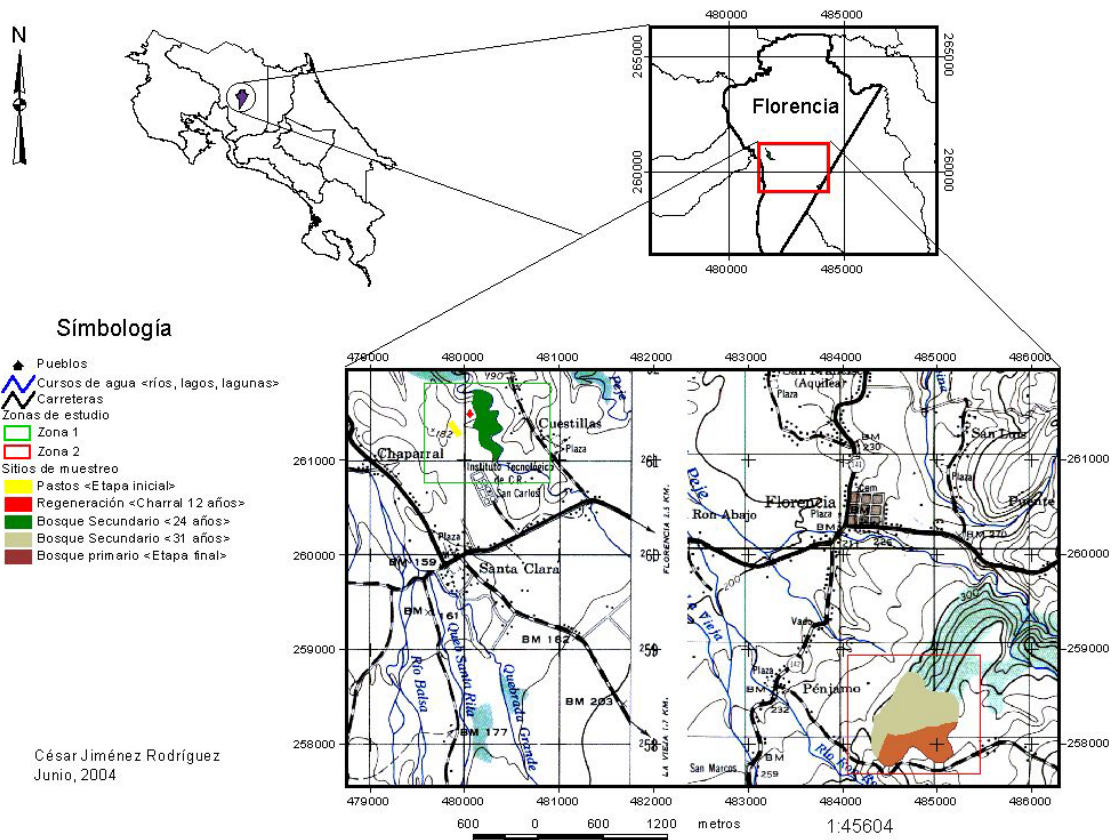
El área del bosque de 12 años fue inicialmente dedicada al cultivo de banano, en la cual se estableció posteriormente una plantación de *Terminalia amazonia*, que fue abandonada tras la pérdida de los árboles posterior al establecimiento. Este sitio a pesar de la edad tiene características muy similares a un charral recién establecido por el grado de infestación de lianas. El área está dominada por especies heliófitas de rápido crecimiento de las familias Cecropiaceae, Malvaceae, Piperaceae, Musaceae entre otras, las cuales originan un dosel cuya altura varía entre 3 y 5 m.

El bosque secundario de 24 años, cubre un área de 19 ha aproximadamente; utilizada en el pasado para el cultivo del *Coffea arabica*. Este bosque contiene 89 especies representantes de 29 familias arbóreas de importancia forestal, como Anacardiaceae, Apocynaceae, Bignonaceae, Bombacaceae, Vochysaceae, entre otras (Mena, 2002).

El segundo sector de estudio se localiza cerca de la localidad de Pénjamo, San Carlos; contiene al bosque secundario maduro (31 años) y el área de bosque primario como la etapa clímax. Esta zona presenta un relieve quebrado (30% de pendiente). El bosque secundario maduro fue dedicado al pastoreo y al cultivo de “Yuca” (*Manihot esculenta*), tiene un área de aproximadamente 4 ha, presenta 33 especies agrupadas en familias de importancia forestal como Anacardiaceae, Bombacaceae, Boraginaceae, Burseraceae, Myristicaceae, entre otras. La altura promedio de los árboles alcanza los 22 m (Quirós, 1999).



El bosque primario forma parte de un bloque de 1110 ha de bosque (Ortiz, 2000), cuya vegetación es muy similar a la del bosque secundario de 31 años. Cabe resaltar la existencia de otras especies como la “caobilla” (*Carapa guianensis*) y palmas con muy buen desarrollo.



**Figura 1.** Mapa de ubicación de los sitios de muestreo. Florencia, Alajuela, Costa Rica. 2004.

### 3.2 Muestreo

La toma de muestras para los análisis de suelo y raíces se realizaron de forma aleatoria dentro de cada uno de los sitios de estudio. Se seleccionaron 3 sitios dentro de cada tipo de cobertura; en cada punto de muestreo se realizó una calicata de un metro de profundidad en la cual se tomaron tres muestras de suelo y raíces cada 10 cm hasta abarcar un metro. Para la obtención de las muestras de raíces se procedió a la utilización de un anillo metálico de 10 cm de alto y 10,16 cm de diámetro; para la obtención de las muestras de suelo se utilizó un cilindro metálico de 5 cm de alto y 5,08 cm de diámetro; las muestras fueron empacadas en bolsas de polietileno para su transporte al laboratorio.

En el laboratorio, las muestras de raíces fueron lavadas y separadas por medio de un tamiz de 0,5 mm de apertura después de una inmersión en agua (Figura 2). Se separaron las raíces más gruesas

y otros residuos procurando dejar en la muestra solamente las raíces inferiores a 5 mm de diámetro, se determinó su peso gravimétricamente tanto seco como húmedo (biomasa).



**Figura 2.** Lavado y separación de raíces (a). Residuos y raíces de cada muestra (b)

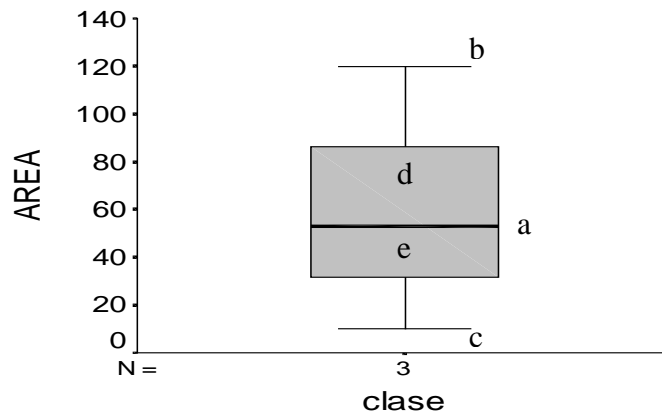
Con la ayuda del software WinRHIZO Pro 3.9g se determinó el área y largo de las raíces en estado húmedo, por medio de estos valores se pudo estimar la biomasa ( $\frac{g}{m^2}$ ), densidad lineal ( $\frac{m}{m^2}$ ) y el índice de área radical ( $\frac{m^2}{m^2}$ ). Se realizaron análisis físicos (a cada una de las muestras de suelo) para determinar la densidad aparente y real ( $\frac{g}{cm^3}$ ) por medio del picnómetro, los valores de porosidad total (%) y el contenido de humedad (%); la textura del suelo expresada en porcentaje de arcilla, fue estimada por medio del método de Bouyoucos y la compactación ( $\frac{kg}{cm}$ ) de cada una de las profundidades por medio de un penetrómetro de  $0.1781 \text{ cm}^2$  de área.

### 3.3 Análisis

Se analizaron las relaciones entre el tipo de cobertura, profundidad y edad; tomando como variables de comparación la biomasa radical, la densidad lineal, el RAI, y las propiedades físicas del suelo obtenidas tanto en el campo como en el laboratorio. Los análisis estadísticos se realizaron por medio del programa SPSS 8.0 Standard versión.

Se compararon los valores medios de biomasa con la profundidad de muestreo en las diferentes coberturas; se comparó la biomasa radical, la densidad lineal y el RAI en cada una de las coberturas muestreadas, para determinar variaciones con respecto a la edad y cobertura dominante. La interpretación se basó principalmente en el análisis de varianza y pruebas de comparación múltiple (prueba de Tukey), para determinar diferencias entre las distintas relaciones establecidas ( $p < 0.05$ ).

Las comparaciones se graficaron por medio de “boxplot”, en los cuales se muestran los valores de la mediana, valores máximos y mínimos, y los cuartiles de cada uno de los valores extremos (Figura 3).



**Figura 3.** Descripción de los gráficos “boxplot” utilizados en el análisis de resultados. a) mediana; b) valor máximo, c) valor mínimo, d) primer cuartil del valor máximo y e) primer cuartil del valor mínimo.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Biomasa radical

#### 4.1.1 Variación de la Biomasa en función de la profundidad.

La biomasa radical presenta una alta concentración en los primeros 10 cm de suelo; debido a que en este horizonte se presentan los valores más bajos de densidad real y compactación, lo que aumenta considerablemente la disponibilidad de agua y el movimiento de aire a través del sustrato, además, los valores de arcilla aumentan conforme se avanza más hacia el interior del suelo, lo que recae en un aumento paulatino en la compactación de los perfiles más profundos.

La relación existente en los sitios estudiados, presentan una disminución de la biomasa conforme se aumenta en la profundidad de muestreo (figura 4); esta disminución mantiene un patrón similar con la variación de algunas propiedades físicas del suelo que varían conforme la profundidad aumenta.

Esta disminución de biomasa radical puede oscilar entre el 55% y el 98% de la biomasa del primer horizonte, demostrando claramente la disminución de manera exponencial dentro del sustrato que concuerda con varios investigadores que demuestran que el comportamiento de las raíces finas con respecto a la profundidad se caracteriza principalmente por la alta concentración de biomasa en los primeros centímetros del suelo, disminuyendo gradualmente conforme se aumenta la profundidad; debiéndose principalmente al aumento en la compactación del sitio, aumento de la arcilla, disminución de la porosidad y capacidad de absorción de humedad en el perfil del sustrato (Deans, 1996, Fujita y Yanagisawa, 1999, Hertel et al, 2003, Jackson et al, 1997, Raich, 1983).

Alfaro *et al* (2001), mencionan que la concentración de la biomasa de raíces se localiza prioritariamente en los primeros horizontes del suelo, debido principalmente a la alta tasa de actividad microbial y a la acumulación de nutrientes en estas capas superficiales. Estos aspectos no fueron considerados en este estudio.

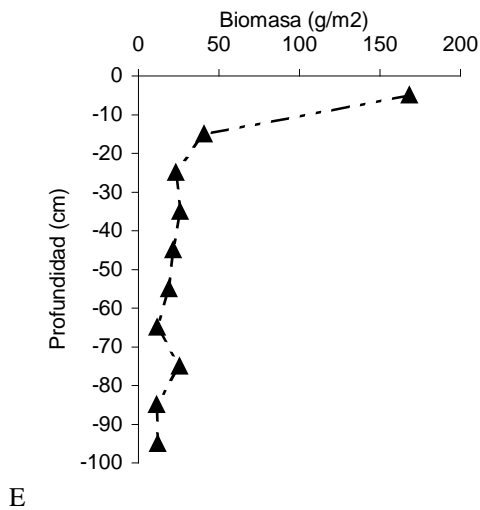
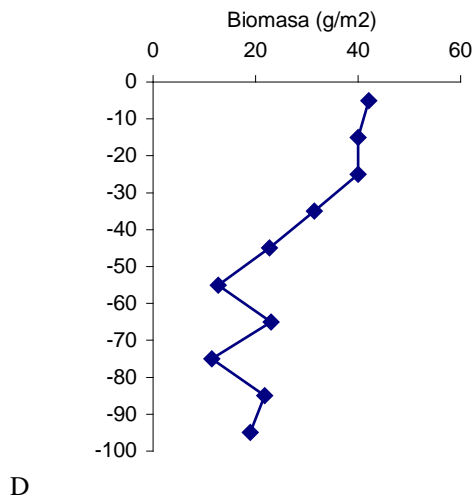
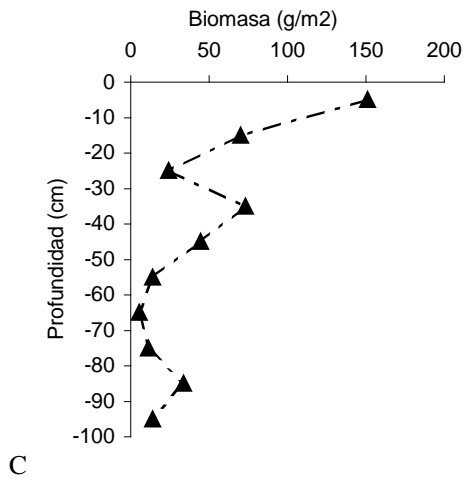
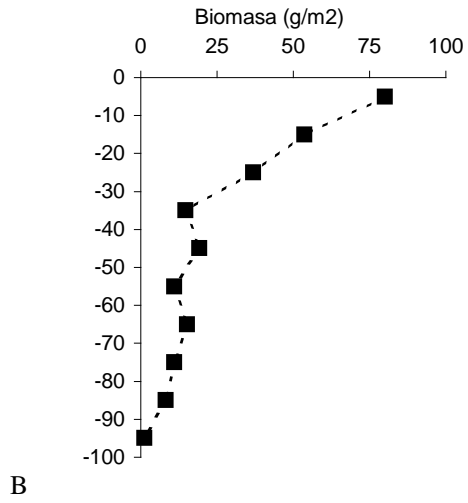
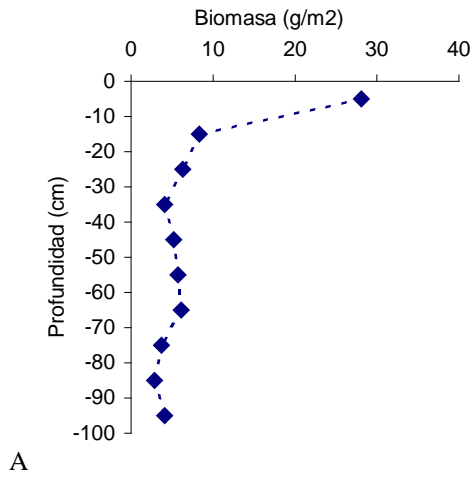
Conforme aumenta la profundidad, aumentan considerablemente algunas propiedades del suelo que generan una mayor compactación, lo que dificulta el desarrollo de raíces finas por parte de las plantas debido a que por su estructura, no pueden crecer adecuadamente bajo condiciones de compactación y altas presiones, además, por la alta compactación existe una menor disponibilidad de aire, lo que dificulta enormemente el intercambio gaseoso de las raíces con el sustrato (Flores, 1999; Jensen, 1994).

Fujita y Yanagisawa (1999), demostraron como varias especies arbóreas de los géneros *Quercus* sp., *Pinus* sp., *Ilex* sp., *Lyonia* sp., *Juniperus* sp. y *Sytrax* sp. lograban fijar en profundidades que oscilan entre los 90 cm y 100 cm gran cantidad de raíces finas (< 2mm) en Japón.

Por otra parte se logra destacar como en el pasto, el bosque secundario de 12 años y el bosque primario (figura 4, graficos a, b y c respectivamente), la variación de la biomasa se encuentra diferenciada por los altos valores en el primer horizonte, mientras que en el bosque secundario de 24 años la diferencia radica en la presencia de un valor extremadamente bajo en relación con el resto de profundidades del sitio; si bien es cierto que la biomasa tiende a disminuir con la profundidad, por debajo de los 30 cm de profundidad los diferentes ecosistemas mantienen valores muy similares que no presentan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ).

Estas variaciones pueden ser atribuidas principalmente al tipo de vegetación que se encuentra en el sitio de estudio, ya que de esta variable depende la penetración de las raíces en el sustrato; esto se debe a que plantas como los pastos no poseen una capacidad de penetración lo suficientemente efectiva como para fijar a grandes profundidades un número considerable de raíces finas, mientras que las especies arbóreas si poseen dicha capacidad de penetración y alocación de un número considerable de raíces.

Cabe resaltar que existen algunos sitios en los que la biomasa radical varía de una manera atípica en ciertas profundidades, denotando la alta variabilidad que existe en la distribución vertical de las raíces finas dentro de un mismo sitio.



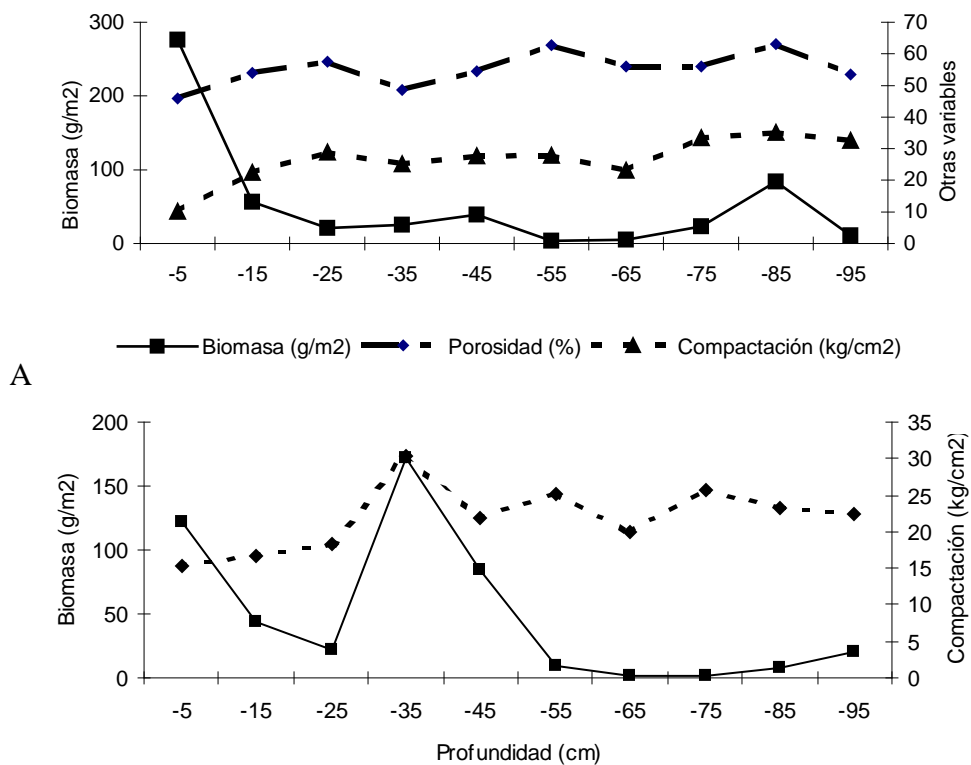
**Figura 4.** Variación de la biomasa de raíces finas (<5 mm) en función del tipo de cobertura y profundidad de muestreo. Florencia, Alajuela, Costa Rica. 2004. a) pastos; b) bosque secundario de 12 años; c) bosque secundario de 24 años; d) bosque secundario de 31 años; e) bosque primario.

En los sitios muestreados bajo el bosque secundario de 24 y el de 31 años, respectivamente, se observan fluctuaciones que se alejan del comportamiento exponencial esperado (Figura 4, gráficos c y d). Esto indica que también existe variabilidad en la distribución vertical de las raíces finas dentro de un mismo sitio. El análisis de propiedades físicas del suelo revela cambios en los valores de compactación del suelo (Figura 5). Un aumento en la compactación del suelo a 35 cm de profundidad fue asociado a la presencia de pedregosidad y textura arenosa; sin embargo, esta anomalía mejora considerablemente la porosidad del sitio, por lo que las raíces tienen una serie de condiciones para la aireación, así como la presencia de humedad que les permite crecer libremente y sin restricciones en ese estrato analizado. Resultados similares fueron reportados por Carvajal (2003) en Monteverde, Costa Rica; donde la presencia de capas arenosas en el perfil del suelo, causó un aumento en la biomasa radical.

La variación presente en el bosque secundario de 24 años revela un aumento de la biomasa en dos de las calicatas establecidas. En la primera de ellas se nota un aumento desde los 22.2  $\frac{g}{m^2}$  hasta los 171.38  $\frac{g}{m^2}$ , dicha variación se debe principalmente al aumento en la compactación del horizonte por la presencia de un número significativo de piedras que aumentaron los valores de compactación, pero esta anomalía mejora considerablemente la porosidad del sitio, por lo cual las raíces tienen una serie de condiciones por aireación y presencia de humedad que aunado a que existe un aumento en el porcentaje de arena, las raíces pueden crecer libremente y sin restricciones en ese estrato analizado. En la segunda calicata se presenta el aumento de la biomasa a los 85 cm que se acrecienta desde los 23.44  $\frac{g}{m^2}$  hasta los 83.88  $\frac{g}{m^2}$  debido a un aumento en la compactación y en la porosidad que al igual que en la primera calicata, la presencia de piedras mejoran las condiciones de aireación y de crecimiento radical (Figura 5).

Si bien estas variaciones no representan diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), proveen información de cómo existen características del suelo que mejoran considerablemente las condiciones de crecimiento (Figura 5), por lo tanto el conocimiento de estas características ayudarían en el manejo de plantaciones que requieran un aumento en las raíces finas para mejorar la absorción de nutrientes.

Por otra parte, es importante resaltar la influencia que tienen estas propiedades físicas del suelo sobre la distribución de raíces en los diferentes horizontes, teniendo en cuenta que Fujita y Yanagisawa (1999) considera el contenido de humedad del suelo como una de las principales variables que influyen en el desarrollo de raíces a diferentes profundidades, mientras que Carvajal (2003) menciona que en sitios que presenten variaciones en la textura del suelo conforme se aumenta la profundidad también pueden variar la biomasa de raíces finas en los horizontes afectados.



B

**Figura 5.** Variación de la biomasa radical y características físicas del suelo en función de la profundidad de muestreo en el bosque secundario de 24 años de edad en diferentes calicatas.

#### 4.1.2 Variación de la Biomasa en función del estado sucesional

Teniendo en cuenta que existen diferencias entre los valores de biomasa radical, índice de área radical y densidad lineal de raíces finas en los diferentes ecosistemas del planeta (Jackson et al, 1997), además, estas variaciones pueden ser atribuidas principalmente a la edad del ecosistema o estrato que se evalúa (Hertel et al, 2003; Raich, 1983; Sierra, 2001; Vanninen et al, 1999; entre otros) y al tipo de vegetación presente en dichos ecosistemas (Alfaro et al, 2001; Cavelier et al, 1999; Hertel et al, 2003); se logra determinar claramente que el suelo es un ecosistema dinámico en el cual las raíces finas juegan un papel importante en el mejoramiento de las condiciones físico-químicas del suelo (Alfaro et al, 2001), con lo que se logra determinar que la concentración de raíces al igual que la cobertura aérea difieren según el estado sucesional y el tipo de vegetación presentes en los sitios.

En los sitios de estudio se observó claramente como los valores de biomasa varían según la edad de la cobertura que ahí se encuentra. Estas variaciones oscilan entre los 74.62 g/cm<sup>2</sup> en los sitios de menor concentración hasta los 440.64 g/cm<sup>2</sup> en el sitio de mayor concentración.

Esta variación presenta un crecimiento desde los pastos (74.62 g/cm<sup>2</sup>) hasta el bosque secundario de 24 años de edad (440.62 g/cm<sup>2</sup>), además, se observa una disminución abrupta de la biomasa en

el bosque secundario de 31 años ( $264.14 \text{ g/cm}^2$ ), para aumentar paulatinamente hasta el bosque primario ( $357.77 \text{ g/cm}^2$ ), lo que denota una clara variación de las condiciones de sitio entre los sectores evaluados en el estudio (Figura 6).

Esta variación contrasta fuertemente con la tendencia de aumento con la edad que describe Sierra et al (2001), donde mencionan el aumento de la biomasa radical en el bosque premontano colombiano conforme aumenta la edad del sitio, llegando a un punto en el cual las diferencias entre el bosque primario y secundario son despreciables.

Conforme se avanza hacia estados sucesionales maduros, se incrementa la variación en los valores de la biomasa y se presentan fluctuaciones atribuibles al efecto del sitio. Esta tendencia irregular se podría explicar en este estudio por las diferencias en la topografía; donde los sitios de pastos, bosque (12 años) y el bosque secundario (24 años) presentan una topografía plana; mientras que el bosque secundario de 31 años y el bosque primario presentan una topografía más ondulada, creando diferencias en el desarrollo radical debido a las condiciones edáficas. Si bien es cierto, los sitios se encuentran en la misma zona de vida (Bosque muy Húmedo Premontano) y tipo de suelo (Inceptisoles), la variación existente en el desarrollo de raíces en condiciones topográficas diferentes (terreno quebrado y terreno plano), se caracteriza por una mayor concentración de raíces en el sector plano, mientras que en posiciones topográficas con mayores pendientes, se presenta una menor concentración de biomasa radical de raíces finas debido principalmente a la disponibilidad de humedad en el suelo (Fujita y Yanagisawa, 1999).

Cuando se comparan los datos, se observa claramente una diferenciación entre el bosque secundario de 24 años y el resto de coberturas (Figura 6a); debido principalmente a una mejora en las características físicas del suelo en este sitio, lo que provocó el aumento de la biomasa radical.

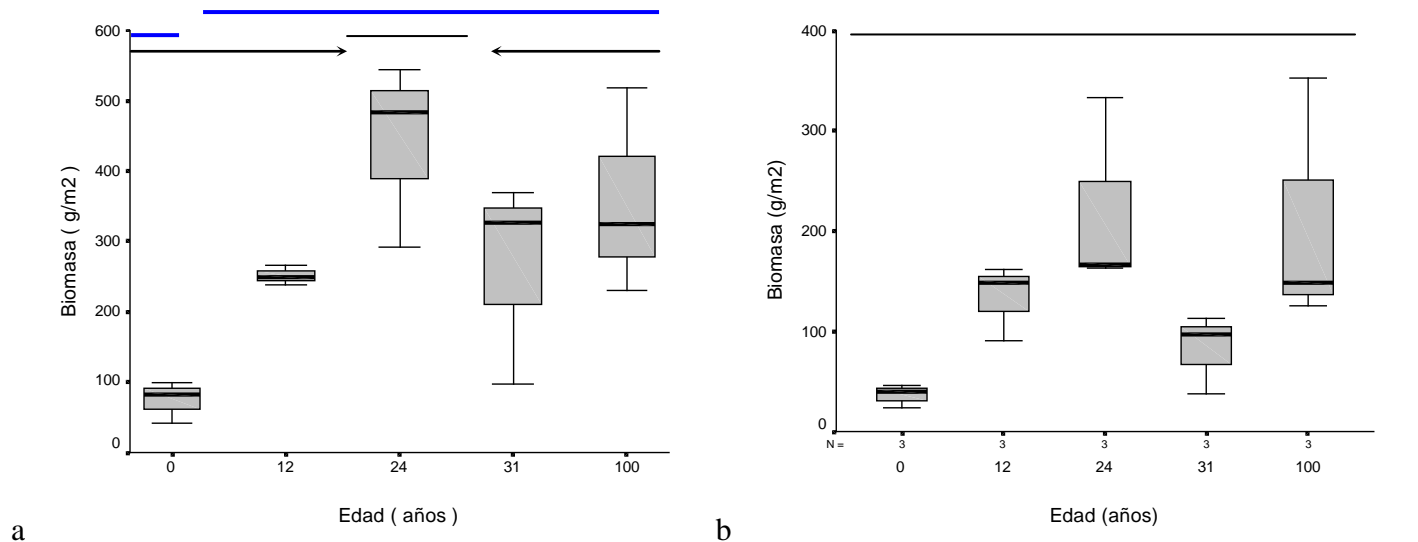
Las diferencias existentes entre el pasto y el resto de coberturas (Figura 6a) se debe principalmente al tipo de vegetación presente en el suelo; los sitios de bosques secundarios y bosque primario, presentan una mayor cantidad de biomasa radical debido a la existencia de especies arbóreas que necesitan una mayor cantidad de raíces finas para sostener su fisiología; mientras que los pastos, si bien es cierto producen una alta cantidad de raíces finas, no presentan el suficiente número como para igualar la cantidad presente en las coberturas arbóreas.

Por otra parte, debido a que la mayor concentración de raíces se encuentra principalmente en los primeros 20 cm del suelo debido a la alta actividad microbial y presencia de aire en el sustrato (Alfaro et al, 2001; Arnáez et al, 2002, Morales 1997) la diferenciación de la biomasa radical entre las diferentes profundidades es indispensable para comprender la dinámica radical en los estratos superficiales en los análisis de cobertura.

La biomasa hasta 1 m de profundidad en el bosque secundario maduro de 31 años, es comparable con la presencia de biomasa radicular con el bosque natural (etapa clímax). Esta variación contrasta fuertemente con la tendencia de aumento con la edad que describe Sierra et al (2001), donde mencionan el aumento de la biomasa radical en el bosque premontano colombiano conforme aumenta la edad del sitio, llegando a un punto en el cual las diferencias entre el bosque primario y el secundario, son despreciables. La variación en los valores de la biomasa en los



primeros 20 cm de profundidad, estadísticamente no permite establecer diferencias entre las etapas sucesionales. Otro estudio realizado en los bosques montanos de Costa Rica, no reportan diferencias significativas en la acumulación de biomasa radical en los primeros 20 cm del sustrato (Hertel et al, 2003).



**Figura 6.** Variación de la biomasa radical en función del sitio. a) análisis de la biomasa hasta 1 m de profundidad y b) análisis de la biomasa hasta los 20 cm de profundidad. Florencia, Alajuela, Costa Rica. 2004.

**Nota:** las líneas sobre los gráficos representan los resultados de las pruebas de comparación múltiple con Tukey ( $p < 0.05$ ). La edad hace referencia al sitio de muestreo: 0 = pastos, 12 = bosque secundario de 12 años, 24 = bosque secundario de 24 años, 31 = bosque secundario de 31 años, 100 = bosque primario

Otra consideración que cabe resaltar es que en el primer horizonte (tanto en pastos como en la cobertura boscosa) se da un alto número de especies herbáceas y arbustivas que cubren toda la superficie aumentando considerablemente los valores de biomasa, pero en todos los sitios las capacidades de fijación de biomasa es similar en los diferentes ecosistemas manteniendo valores similares.

El bosque primario es el que presenta el mayor rango de acumulación de biomasa en los primeros 20 cm ( $288.01 \text{ g/cm}^2$ ), debido al mejoramiento de las propiedades físicas del suelo de esta cobertura en el horizonte orgánico, favoreciendo considerablemente el desarrollo radical en esta cobertura.

## 4.2 Parámetros Radicales

### 4.2.1 Variación del índice de área radical <RAI> en función del estado sucesional

Tomando en consideración, que el área radical guarda relación con la obtención de nutrientes por parte de las plantas (Morales, 1997; Arnáez et al, 2002), se logra rescatar la importancia de este índice para el estudio de productividad de los ecosistemas; debido a que entre mayor sea el área de la raíces finas mayor será el número de tricoblastos, que son las estructuras encargadas de la obtención de nutrientes por parte de la planta (Flores, 1999; Jensen, 1994).

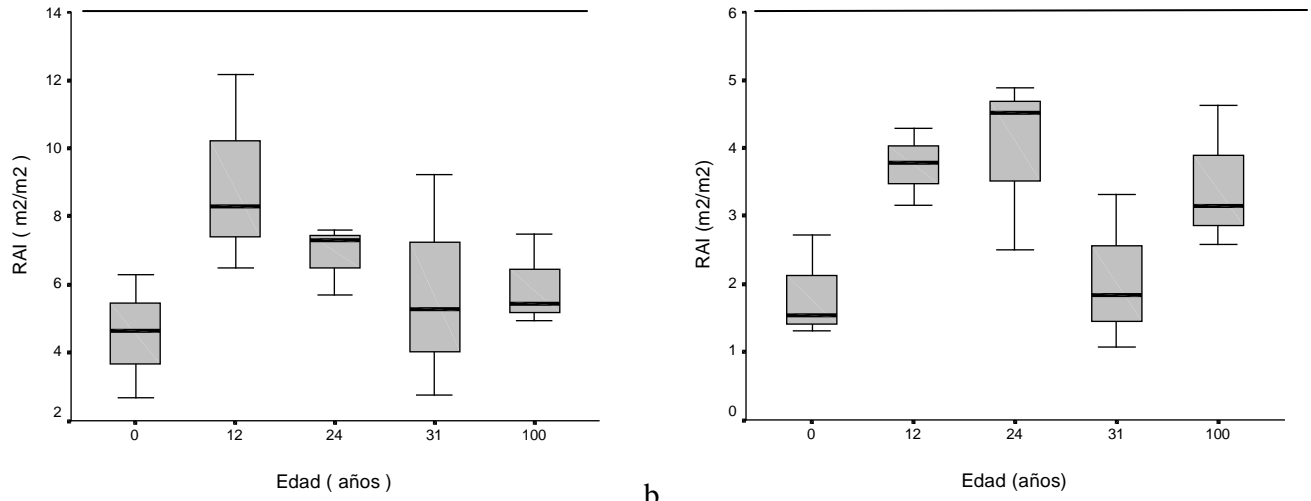
En este estudio se encontró que el comportamiento del índice de área radical (RAI), presenta una tendencia muy irregular y una marcada variación en los valores de las muestras en cada sitio. Estadísticamente, no se encontraron diferencias significativas entre las diferentes etapas sucesionales (Figura 7). Por otra parte, los sitios cubiertos por pasto presentan menor área radical considerando todos los valores hasta 1 m de profundidad y conforme se avanza hacia etapas maduras de sucesión el área radical tiende a disminuir. Cuando se consideran únicamente los valores hasta 20 cm de profundidad (Figura 7 b), se puede observar una tendencia hacia el aumento del área radical conforme se avanza en las diferentes etapas sucesionales. A pesar que en este estudio no se tomó en cuenta parámetros del rodal como el índice de área foliar o el rendimiento por hectárea, es muy probable que el índice de área radical hasta los 20 cm de profundidad refleje la productividad del ecosistema.

Tanto el área radical como la densidad lineal están afectadas directamente por la ubicación en condiciones topográficas completamente distintas, no obstante, el área radical puede servir como un instrumento para determinar las necesidades fisiológicas de la planta.

Por medio del supuesto anterior y observando la Figura 7, se puede resaltar como las áreas de pastos mantienen un RAI bajo debido a su efectivo sistema de absorción de nutrientes y de su alta capacidad de fotosíntesis, lo cual mantiene su bajo RAI.

Por otra parte se denota un incremento del área radical total en el bosque secundario de 12 años ( $8.99 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ) hasta un metro de profundidad mientras que su acumulado en los primeros 20 cm ( $1.87 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ) disminuye en relación con el bosque secundario de 24 años que es el más alto ( $1.98 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ). Esto se debe a un aumento en la cantidad de arena en profundidades más bajas, lo que implica una mayor disponibilidad de nutrientes y agua en profundidades cercanas a los 50 cm lo que ayuda enormemente al crecimiento de las raíces absorbentes en las profundidades del sitio; mientras que en los primeros 20 cm la presencia de mayor cantidad de arena en el bosque secundario de 24 años (44.6%) mejora el crecimiento de raíces en esta cobertura en comparación con el bosque secundario de 12 años que presenta una menor cantidad de arena (36.8%).

Observamos que en los sitios de cobertura boscosa el patrón de crecimiento de RAI experimenta un aumento en los 20 cm al igual que el bosque secundario de 24 años; esto se debe tanto a una mejora en la densidad real y a un aumento en la porosidad del suelo que ayuda tanto al crecimiento de raíces como a la actividad microbial que ayuda a descomponer el mantillo de los sitios.



**Figura 7.** Variación del Índice de Área Radical (RAI) en función del sitio. a) análisis del RAI hasta 1 m de profundidad y b) análisis del RAI hasta los 20 cm de profundidad. Florencia, Alajuela, Costa Rica. 2004.

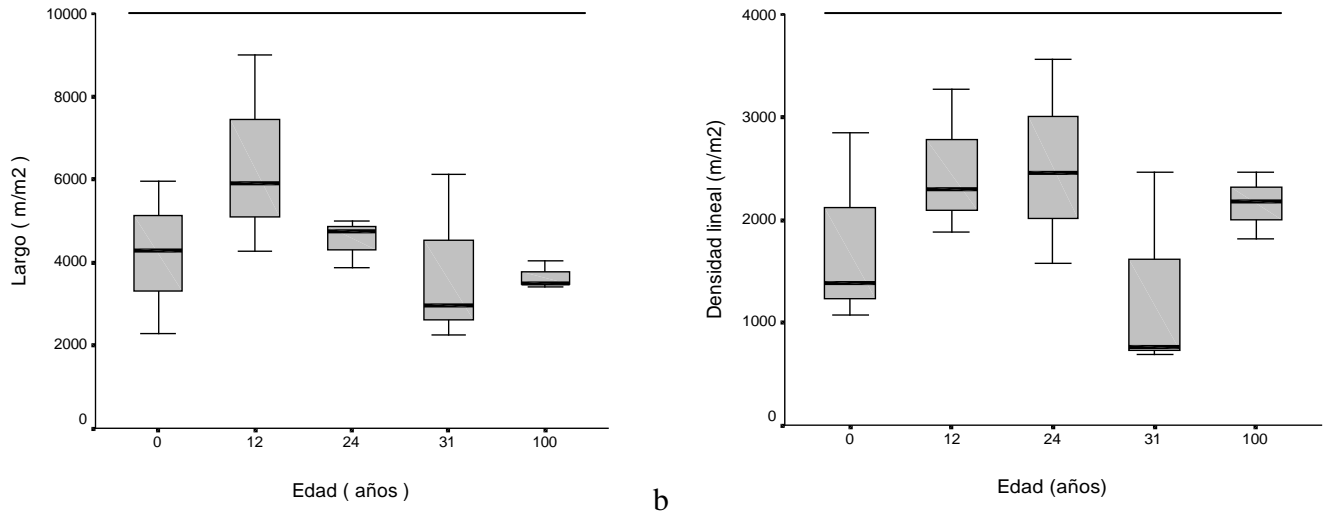
**Nota:** las líneas sobre los gráficos representan los resultados de las pruebas de comparación múltiple con Tukey ( $p < 0.05$ ). la edad hace referencia al sitio de muestreo: 0 = pastos, 12 = bosque 12 años, 24 = bosque secundario de 24 años, 31 = bosque secundario de 31 años, 100 = bosque primario.

Otro aspecto fundamental del RAI es su comportamiento similar al del RLD debido a que el RAI es una estimación que depende del diámetro de las raíces y de la longitud de las mismas por lo que el comportamiento del RAI sigue una tendencia casi igual al RLD por el mejoramiento de las condiciones físicas del suelo que estimulan el desarrollo de raíces finas en determinados horizontes.

Para efectos prácticos en la utilización de este índice, serán necesarias más investigaciones bajo sistemas más controlados, como es el caso de plantaciones forestales de una misma especie, en diferentes condiciones de sitio.

#### 4.2.2 Variación de la densidad lineal <RLD> en función del estado sucesional

Si se tiene en cuenta que la densidad lineal es una de las variables que logra describir el número de raíces finas en un ecosistema determinado, la relación existente ha sido poco estudiada o bien documentada en términos numéricos. El comportamiento de esta variable es muy similar al RAI. Con base en las mediciones hasta 1 m de profundidad, en los sitios estudiados se obtuvieron valores que fluctúan entre 2000 y 9000 m lineales de raíces finas por  $m^2$ . Considerando únicamente los valores hasta 20 cm de profundidad, la densidad lineal fluctúa entre 1000 y 3500  $m/m^2$  (Figura 8).



**Figura 8.** Variación de la Densidad Lineal (RLD) en función del sitio. a) análisis de la densidad lineal total y b) análisis de la densidad lineal hasta los 20 cm de profundidad. Florencia, Alajuela, Costa Rica. 2004.

**Nota:** las líneas sobre los gráficos representan los resultados de las pruebas de comparación múltiple con Tukey ( $p < 0.05$ ). la edad hace referencia al sitio de muestreo: 0 = pastos, 12 = bosque 12 años, 24 = bosque secundario de 24 años, 31 = bosque secundario de 31 años, 100 = bosque primario.

Otro aspecto de interés es la diferencia en la distribución de la densidad longitudinal con respecto a la profundidad, ya que el bosque secundario de 12 años presenta una mayor concentración de biomasa hasta un metro de profundidad ( $6393.86 \text{ m/m}^2$ ), mientras que el bosque secundario de 24 años es el que presenta una mayor cantidad de raíces en los primeros 20 cm ( $1266.53 \text{ m/m}^2$ ); este comportamiento se debe a varios factores que logran interactuar en los sitios de muestreo, el primero de ellos es la diferencia en las especies presentes en los sitios que se aprovechan del mejoramiento de las condiciones físicas del suelo para su desarrollo debido a la disponibilidad de agua y nutrientes necesarios para la planta.

Cuando se compara la cantidad de arena en porcentaje hasta un metro de profundidad se nota claramente que la cobertura de charral presenta un mayor porcentaje de arena que el bosque secundario de 24 años lo que recae en un aumento en el desarrollo de raíces finas en este sitio; no obstante, cuando se comparan los valores hasta los 20 cm de profundidad se nota claramente como el bosque secundario presenta mayor cantidad de raíces.

Al igual que el área radical, el RDL está íntimamente relacionado con la variación de los porcentajes de arena, valores de densidad aparente y porosidad de profundidades más bajas por lo que su comportamiento es similar.

## CONCLUSIONES

Las propiedades físicas del suelo como la textura, la densidad real y la compactación a lo largo del perfil, influyen en la distribución vertical y la cantidad de las raíces finas en los sitios estudiados.

La presencia de texturas arenosas en el perfil del suelo, alteran el patrón de distribución de la biomasa radical y originan un aumento de la biomasa de raíces finas en los horizontes que presentan dicha variación.

El bosque secundario de 24 años es el que presenta la mayor acumulación de biomasa de raíces finas en los primeros 20 cm ( $220.86 \text{ g/m}^2$ ), y a 1 m de profundidad ( $440.64 \text{ g/m}^2$ ). El área de pastos presenta la menor acumulación de biomasa en los primeros 20 cm ( $36.46 \text{ g/m}^2$ ), y a 1 m de profundidad ( $74.62 \text{ g/m}^2$ ).

El bosque secundario de 24 años es el que presenta mayor RAI ( $3.97 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ) en los primeros 20 cm, mientras que las áreas de bosque secundario de 12 años presentan mayor RAI a 1 m de profundidad ( $8.99 \text{ m}^2/\text{m}^2$ ).

El bosque secundario de 12 años es el que presenta mayor densidad longitudinal hasta 1 m de profundidad ( $6393.86 \text{ m}/\text{m}^2$ ), mientras que el bosque secundario de 24 años es el que presenta mayor RLD ( $1266.53 \text{ m}/\text{m}^2$ ) en los primeros 20 cm.

Los parámetros radicales como la densidad lineal y el RAI, siguen una tendencia similar al patrón de variación de la biomasa radical en función de la profundidad del suelo.

La variación topográfica entre sitios estimula la variación en los sistemas radicales de los ecosistemas.

## **RECOMENDACIONES**

Dado que el análisis de la biomasa de raíces finas en los horizontes más superficiales presenta mayor variación, en estudios de distribución de raíces es recomendable incorporar la evaluación hasta 1 m de profundidad.

Para estudios similares se recomienda tomar información sobre rendimiento del bosque y establecer la relación con parámetros radicales. En este sentido se esperaría generar indicadores de productividad de los ecosistemas, en función de la presencia y distribución de las raíces finas.

Es necesario realizar más investigaciones bajo sistemas controlados, como es el caso de plantaciones forestales de una misma especie, en diferentes condiciones de sitio.

Los estudios de biomasa radical deben de tener como elemento primordial la estratificación de zonas en base a sus características topográficas, florísticas y de uso anterior de la tierra.

Dado que la mayor concentración de biomasa radical se localiza en los primeros 30 cm, las estimaciones de biomasa de raíces finas (<5mm) con fines de relacionar productividad para bosques secundarios pueden ser realizadas hasta esta profundidad.

Establecer parcelas de monitoreo de biomasa radical evaluando tanto el factor edáfico como la dinámica de la vegetación para estudiar su comportamiento con el tiempo.

Continuar los estudios que ayuden a la cuantificación de la biomasa radical, con la finalidad de generar modelos para predecir la fijación de carbono de los órganos radicales para ecosistemas tropicales.

## **APORTES Y ALCANCES**

El proyecto logra establecer una base fiel para el desarrollo de futuras investigaciones de raíces que tengan su enfoque en los ecosistemas boscosos del país, ya que se logran establecer diferencias y similitudes entre los diversos ambientes.

Para dar a conocer los resultados obtenidos del proyecto, se publicaran los resultados en la revista electrónica “**Kurú**” de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica por medio del artículo “Distribución de la biomasa y densidad de raíces finas en un gradiente sucesional de bosques en la Zona Norte de Costa Rica” que se publicará el miércoles 6 de octubre del 2004; además, se participará en el primer Simposio sobre Suelos Forestales, auspiciado por la INICIFOR con una conferencia del mismo nombre, los días 25, 26 y 27 de octubre del 2004.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro, E.; Alvarado, A.; Chavarri, A. 2001. Cambios edáficos asociados a tres etapas sucesionales de bosque tropical seco en Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 25(1):7-19.
- Arunachalam, A. 1996. The impact of disturbance on detrital dynamics and soil microbial biomass of a *Pinus kesiya* forest in north-east India. *Forest Ecology and Management*. 88:273-282.
- Arunachalam, A; Pandey H.N.; Tripathi, R.S.; Maithani, K. 1996. Fine root decomposition and nutrient mineralization patterns in a subtropical humid forest following tree cutting. *Forest Ecology and Management*. 86:141-150.
- Arnáez, E; Moreira, I. 2002. Metodologías para el estudio de raíces. Cartago, CR, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Biología. 22p. (Serie de lecturas complementarias N° 9).
- Baker, T. 2003. Associations between tree growth, soil fertility and water availability at local and regional scales in Ghanaian Tropical Rain Forest. *Journal of Tropical Ecology*. 19:109-125.
- Becker, P; Sharbini, N; Yahya, R. 1999. Root architecture and root: shoot allocation of shrubs and saplings in two lowland tropical forests: Implications for life-form composition. *Biotropica*. 31(1):93-101.
- Berish, C. 1982. Root biomass and surface area in three sucesional forests. *Canadian Journal of Forest Research*. 12(3):699-704.
- Berish, C. 1988. Root development in simple and complex tropical sucesional ecosystems. *Plant and Soil*. 106(1):73-84.
- Carvajal, A. 2003. Distribución de raíces finas en suelos del bosque nuboso y pastos en Monteverde, Costa Rica. Informe de práctica de Especialidad. Cartago, CR. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. 68p.
- Cavelier, J; Santos, C. 1999. Efectos de plantaciones abandonadas de especies exóticas y nativas sobre la regeneración natural de un bosque montano en Colombia. *Revista de Biología Tropical*. 47(4):1-7.
- COSEFORMA (Cooperación en los sectores forestal y maderero, C.R.). 1999. Bosque secundario, una reforestación natural. San José, CR. MINAE-GTZ-ITCR-CCF. 8 p.
- Deans, J; Moran, J.; Grace J. 1996. Biomass relationships for tree species in regenerating semi-deciduos tropical moist forest in Cameroon. *Forest Ecology and Management*. 88:215-225.
- Flores, E. 1999. La planta, estructura y función. Cartago, C. R. LUR. 884 p.



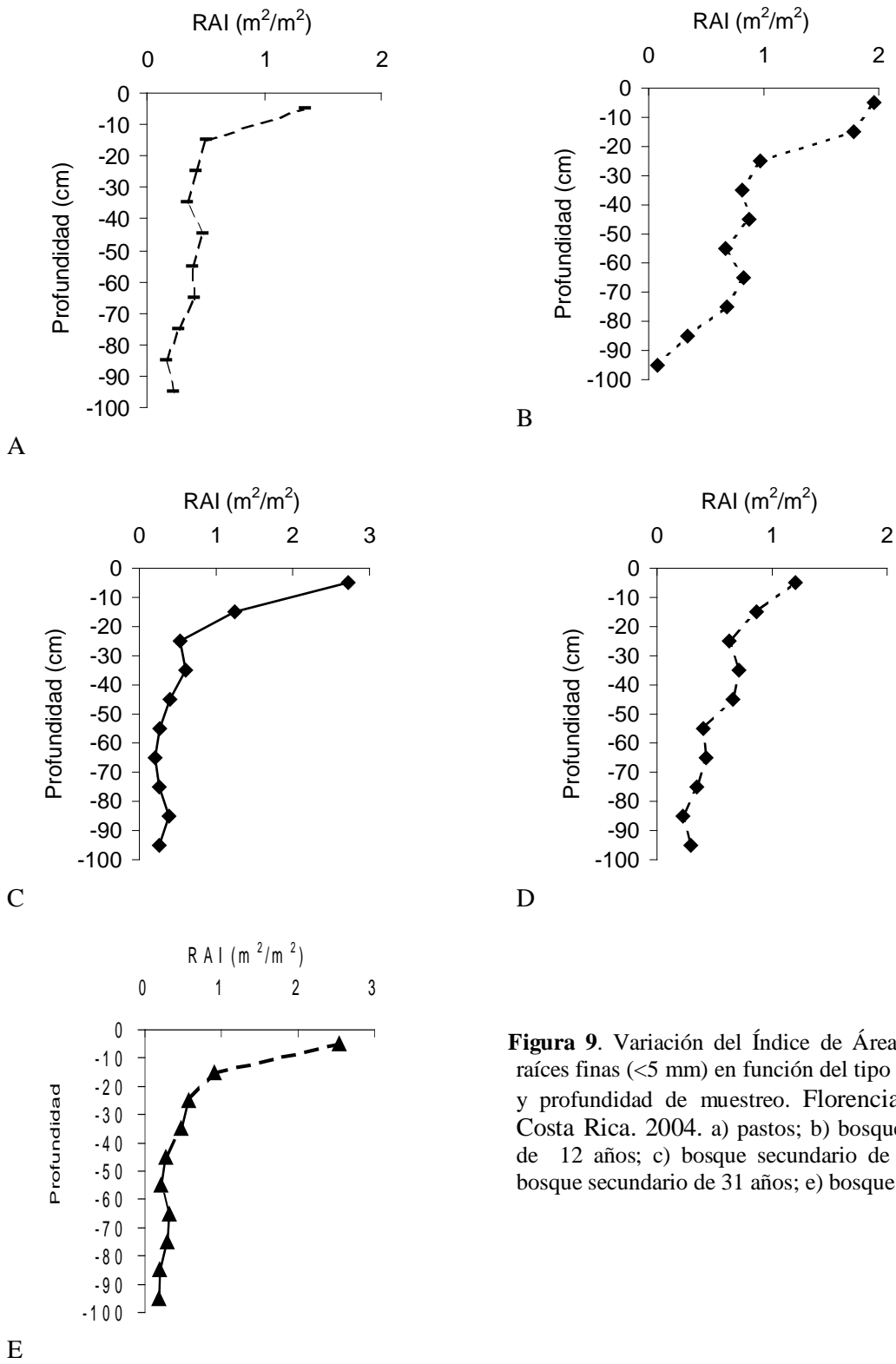
- Fujita, N; Yanagisawa, N. 1999. Different distribution patterns of woody species on a slope in relation to vertical root distribution and dynamics of soil moisture profiles. *Ecological Research*. 14:165-177.
- Hertel, D; Leuschner, C; Hölscher. 2003. Size and structure of fine root systems in old-growth and secondary tropical montane forests (Costa Rica). *Biotropica*. 35(2):143-153.
- Jackson, R; Mooney, H; Schulze, D. 1997. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Ecology*. National Academy of Sciences. 94:7362-7366.
- Jensen, W. 1994. *Botánica*. 2<sup>a</sup>. ed. Distrito, Federal, MX. McGRAW-HILL. 762 p.
- Mena, O. 2002. Estudio poblacional de Productos No Maderables del Bosque (PNMB) en un bosque en Santa Clara, Florencia, San Carlos. Informe de práctica de especialidad. Cartago, CR. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 220 p.
- Morales, A. 1997. Apuntes metodológicos para el estudio de raíces en plantaciones forestales y bosques naturales. In: Simposio Internacional - Posibilidades del Manejo Forestal Sostenible en América Tropical. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia. CATIE. 11 p.
- Müller, E. 2002. Los bosques secundarios salen a la luz. *Actualidad Forestal Tropical* 10/4. Yokohama, JP. OIMT. 3 p.
- Ortiz, E. 2000. Atlas Costa Rica 2000. Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica. Cartago, CR. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal.
- Quirós, S. 1999. Determinación y aplicación de tratamientos silviculturales en un bosque secundario, Pénjamo, Florencia, San Carlos, Alajuela, Costa Rica. Informe de práctica de especialidad. Cartago, CR. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. 102 p.
- Raich, J. 1980. Fine roots regrow rapidly after forest felling. *Biotropica*. 12(3).
- Raich, J. 1983. Effects of Forest Conversion of the Carbon Budget of a Tropical Soil. *Biotropica* 15(3):177-184.
- Sierra, C; Del Valle, J; Orrego, S. 2001. Ecuaciones de biomasa y sus tasas de acumulación en bosques sucesionales maduros y tropicales de Colombia. En: Simposio internacional de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile. 12 p.
- Smith, J; Sabogal, C.; de Jong, W.; Kaimowitz, D. 1997. Bosques secundarios como recurso para el desarrollo rural y la conservación ambiental en los trópicos de América Latina. Jakarta, ID, CIFOR. 36p. (Ocasional Paper N° 13. CIFOR).

Vanninen, P; Mäkelä, A. 1999. Fine root biomass of scots pine stands differing in age and soil fertility in southern Finland. *Tree Physiology*. no19:823-830.

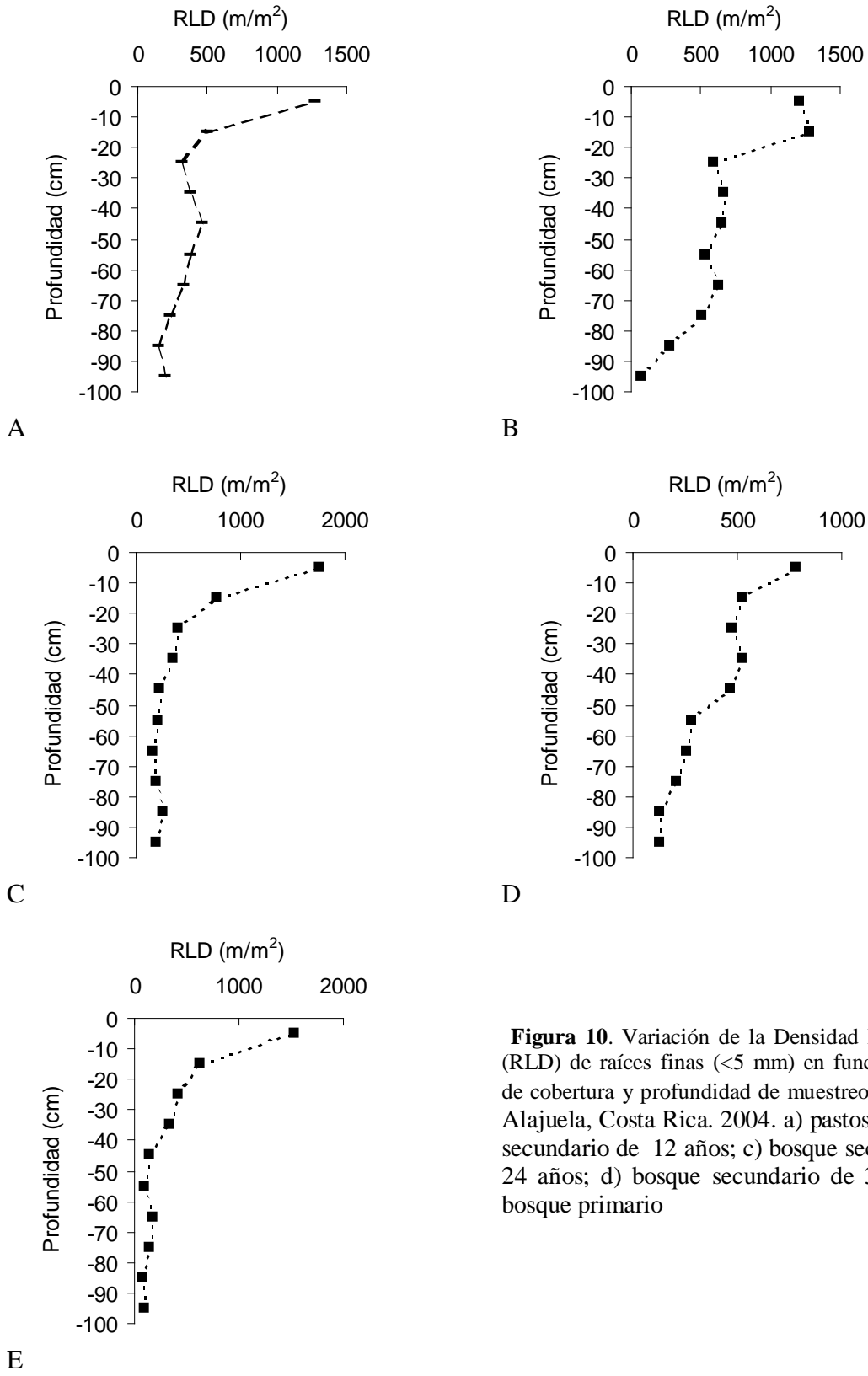
Vesterdal, L; Dalsgaard M.; Felby C.; Raulund-Rasmussen K.; Jorgensen B.B. 1995. Effects of thinning and soil properties on accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus in the forest floor of Norway spruce stands. *Forest Ecology and Management*. 77(1-10):1-8.

Visalakshi, N. 1994. Fine root dynamics in two dry evergreen forests in Southern India. *Biosciences*. 19(1):103-16.

## ANEXOS



**Figura 9.** Variación del Índice de Área Radical de raíces finas (<5 mm) en función del tipo de cobertura y profundidad de muestreo. Florencia, Alajuela, Costa Rica. 2004. a) pastos; b) bosque secundario de 12 años; c) bosque secundario de 24 años; d) bosque secundario de 31 años; e) bosque primario



**Figura 10.** Variación de la Densidad Longitudinal (RLD) de raíces finas (<5 mm) en función del tipo de cobertura y profundidad de muestreo. Florencia, Alajuela, Costa Rica. 2004. a) pastos; b) bosque secundario de 12 años; c) bosque secundario de 24 años; d) bosque secundario de 31 años; e) bosque primario

**Cuadro 2.** Variación de la Biomasa Radical, Índice de Área Radical y Densidad Lineal en función del sitio de muestreo. Florencia, Alajuela, Costa Rica. 2004.

Sitio	Biomasa (g/m <sup>2</sup> )	Índice de Área Radical (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Densidad Lineal (m/m <sup>2</sup> )
Pastos	74.62	4.54	4179.29
Bosque 12 años	251.10	8.99	6393.86
Bosque secundario de 24 años	440.64	6.87	4536.96
Bosque secundario de 31 años	264.14	5.76	3780.23
Bosque Primario	357.77	5.95	3657.60

**Cuadro 3.** Variación de las principales propiedades físicas del suelo en función del sitio y profundidad de muestreo. Florencia, Alajuela, Costa Rica. 2004.

Sitio	Muestreo Profundidad ( cm )	Densidad		Porosidad ( % )	Contenido de Humedad ( % )	Textura		Compactación ( kg/cm <sup>2</sup> )
		Aparente ( g/cm <sup>3</sup> )	Real ( g/cm <sup>3</sup> )			Arena ( % )	Arcilla ( % )	
Pastos	5	1.11	2.31	51.04	59.49	16.59	62.70	20.04
	15	1.14	2.68	57.61	47.69	16.59	62.70	29.50
	45	1.24	2.71	53.73	49.60	5.59	79.83	27.99
	55	1.15	2.88	59.41	48.99	2.18	86.37	29.65
	85	1.21	3.13	60.98	47.18	2.18	86.37	27.76
	95	1.17	3.14	62.23	50.55	2.18	86.37	28.56
Bosque ( 12 años )	5	1.00	2.15	53.28	62.88	36.84	39.57	11.35
	15	1.21	2.64	54.25	46.09	36.84	39.57	18.53
	45	1.36	3.16	57.01	38.72	33.55	49.70	24.36
	55	1.36	3.13	56.05	41.14	27.47	56.37	25.50
	85	1.39	3.01	53.40	42.19	27.47	56.37	27.24
	95	1.40	3.13	55.10	42.36	27.47	56.37	28.90
Bosque Secundario ( 24 años )	5	1.09	2.28	50.88	54.76	44.59	38.20	11.38
	15	1.23	2.50	50.72	47.98	44.59	38.20	22.50
	45	1.23	2.98	58.98	40.47	14.97	62.41	25.96
	55	1.21	2.94	58.63	43.21	16.13	61.03	27.10
	85	1.24	3.31	62.06	48.56	16.13	61.03	29.50
	95	1.31	2.96	55.60	45.66	16.13	61.03	26.87
Bosque Secundario ( 31 años )	5	0.95	2.08	53.80	66.05	22.09	58.91	16.75
	15	0.86	1.96	56.28	56.06	22.09	58.91	19.95
	45	0.90	2.44	63.00	50.10	13.01	67.24	22.76
	55	1.06	3.03	64.78	50.34	5.55	77.45	24.19
	85	1.08	3.09	64.67	53.11	5.55	77.45	31.70
	95	1.17	3.02	61.27	47.12	5.55	77.45	32.10
( Bosque Primario )	5	0.84	2.03	58.18	68.88	27.43	48.28	18.15
	15	0.99	2.50	59.57	51.63	27.43	48.28	26.93
	45	1.07	2.91	62.94	45.31	11.09	63.03	27.90
	55	1.09	1.90	66.68	44.91	6.93	68.20	29.10
	85	1.13	2.88	59.62	41.66	6.93	68.20	23.90
	95	1.18	3.31	63.91	41.16	6.93	68.20	26.84

## DOCUMENTO II

### I. Cumplimiento de objetivos:

Se cumplió satisfactoriamente con los objetivos que hacen referencia al análisis de **la relación existente entre las raíces y la etapa de sucesión del bosque** y el que analiza **la variación de la biomasa y densidad de raíces en diferentes profundidades de muestreo y en función de las características físicas del suelo.**

Por otra parte, el objetivo que hace referencia a la **evaluación de técnicas para el análisis de raíces finas basado en el procesamiento de imágenes digitales, microscopio de captura de imágenes e indicadores de reducción bioquímica** se cumplió parcialmente debido a dificultades logísticas, económicas y de disponibilidad de tecnología y reactivos apropiados para el análisis de las muestras. De este objetivo la sección de uso de indicadores de reducción bioquímica no se llevó a cabo debido al precio del reactivo necesario para esta actividad que era muy alto y no justificaba su compra, además de haber existido el reactivo esta parte del objetivo no se podría haber llevado a cabo por la disponibilidad de tiempo requerida para este análisis. La sección que hace referencia al análisis de imágenes digitales y captura por medio de microscopio electrónico se sustituyó por el uso de imágenes digitales obtenidas por medio del software WinRHIZO Pro 3.9g facilitado por la profesora Ana Tapia de la Escuela de Biología de la Universidad de Costa Rica (Sede Atlántica), por medio del cual se logró determinar una serie de variables relacionadas con la raíces finas (Índice de Área Radical <RAI> y Densidad Radical Longitudinal <RLD>) que ayudaron significativamente en el análisis de resultados.

### II. Limitaciones y problemas encontrados

#### *Transporte*

Debido a la diferencia de distancias entre algunos de los sitios de muestreo y el centro de estadía se experimentó pérdida de tiempo; tanto en el transporte de herramientas, como en la movilización diaria a los sitios de muestreo y que produjo desgaste físico generando bajo rendimiento durante la toma de muestras y datos de campo, resultando mayor que el tiempo establecido en las visitas previas.

Por lo anterior se debe procurar en futuros proyectos similares, que los sitios de investigación no disten a más de cinco kilómetros del centro de estadía, para lograr mayor efectividad y rendimiento en tiempo en los muestreos.

#### *Tecnológicas*

Debido a la carencia de equipo especializado para la captura de imágenes digitales de raíces finas y software para su análisis dentro de la institución, se experimentaron retrasos en el análisis de muestras radicales. Dicho inconveniente fue superado gracias a la colaboración del profesor asesor y personas ajenas a la institución que contribuyeron desinteresadamente con el préstamo de

equipo de captura de imágenes por medio de escáner y el software WinRHIZO Pro 3.9g para el análisis de la información.

### *Tiempo*

Aún con la existencia de un cronograma para el proyecto y habiendo realizado prácticas para la toma de tiempo requeridos en algunos de los procesos involucrados en el proyecto, fue necesario la utilización de tiempo no programado en el análisis de imágenes, procesamiento de muestras y en la búsqueda de información bibliográfica. Algunas de estas limitaciones fueron superadas por medio de la ayuda de compañeros de estudio que dieron parte de su tiempo para ayudar en el desarrollo del trabajo de campo y procesamiento de muestras además de la búsqueda de información.

### *Económicas*

Teniendo en cuenta la restricción económica con que contó el proyecto, no se logró comprar el reactivo necesario para el análisis de viabilidad de raíces dado el alto costo de este como por la cantidad requerida en el estudio. Por otra parte, el financiamiento propio propone una limitación importante en el desarrollo de la investigación cuando se presentan inconvenientes con los que hay que modificar el presupuesto diario para alimentación en la compra de material y equipo faltante para el desarrollo del proyecto.