

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y
ENSEÑANZA (CATIE)**

**PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA
CONSERVACIÓN**

ESCUELA DE POSGRADO

Aporte de los sistemas silvopastoriles al secuestro de carbono en el suelo.

Tesis sometida a la consideración de la escuela de Posgrado para optar por el grado de

Magister Scientiae

por

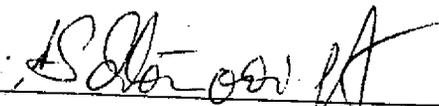
ALEJANDRO LÓPEZ MUSALEM

Turrialba, Costa Rica
1998

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por la Dirección de la Escuela de Postgrado en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del CATIE y aprobada por el Comité Asesor del estudiante como requisito parcial para optar al grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

FIRMANTES:



Andrea Schlönvoigt, Ph.D.
Profesor Consejero



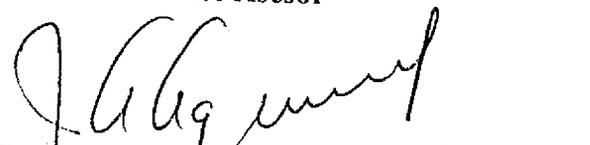
Muhammad Ibrahim, Ph.D.
Miembro Comité Asesor



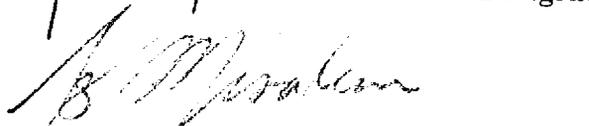
Christoph Kleinn, Ph.D.
Miembro Comité Asesor



Markku Kanninen, Ph.D.
Miembro Comité Asesor



Juan Antonio Aguirre, Ph.D.
Director y Decano de la Escuela de Postgrado



Alejandro López Musalem
Candidato

AGRADECIMIENTOS

Al pueblo de México, que a través de CONACYT me proporcionó parte de la beca para realizar esta maestría.

Al Comité Asesor, los dres. A. Schlönvoigt, M. Ibrahim, M. Kanninen y C. Kleinn, por su apoyo y valiosa asesoría para culminar esta tesis.

A todo el personal de la escuela de Posgrado y de la biblioteca Orton de este Centro, por su amabilidad y apoyo.

A los profesores y personal de apoyo del Área de Agroforestería y del Centro de Cómputo, por todas las facilidades brindadas.

INDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1. Introducción general	
CAPITULO 2. El calentamiento global y la agroforestería: El potencial de los sistemas silvopastoriles en el secuestro de CO ₂	3
2.1 El problema del calentamiento global	4
2.2 Fuentes y depósitos de CO ₂ en los sistemas terrestres	5
2.2.1 La vegetación	5
2.2.2 El suelo	10
2.3 El aporte de las pasturas al secuestro de CO ₂ en el neotrópico	11
2.4 Conclusiones	13
2.5 Bibliografía	13
CAPITULO 3. Secuestro de Carbono en el suelo por un sistema silvopastoril con pasto guinea (<i>Panicum maximum</i> Jacq) y laurel (<i>Cordia alliodora</i> R&P, Oken) bajo regeneración natural en la zona Atlántica de Costa Rica	16
3.1 Introducción	17
3.2 Materiales y Métodos	20
3.2.1 Descripción del Sitio	20
3.2.2 Muestreo y Mediciones	21
3.2.3 Análisis de Datos	22
3.3 Resultados	23
3.3.1 Crecimiento de las Especies	23
3.3.2 Secuestro de Carbono en el Suelo	24
3.4 Discusión	26
3.4.1 Crecimiento de las Especies	26
3.4.2 Secuestro de Carbono en el Suelo	26
3.5 Conclusiones	28
3.6 Bibliografía	29
CAPITULO 4. Distribución de las raíces finas y su aporte al secuestro de carbono en un sistema silvopastoril con <i>Panicum maximum</i> Jacq. y <i>Cordia alliodora</i> (R&P) Oken en regeneración natural en la zona Atlántica de Costa Rica	32
4.1 Introducción	33
4.2 Materiales y Métodos	35
4.2.1 Descripción del Sitio	35
4.2.2 Muestreo y Mediciones	36
4.2.3 Análisis de Datos	37
4.3 Resultados	38
4.4 Discusión	40
4.5 Conclusiones	41
4.6 Bibliografía	42
CAPITULO 5. Conclusiones y Recomendaciones generales	45
ANEXOS	47

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

CAPITULO 2

Figura 1. Depósitos y flujos anuales de carbono a nivel global	6
Tabla 1. Estimaciones globales de la cantidad de C que podría ser secuestrado y conservado por medio de prácticas de manejo forestal de 1995 a 2050	7
Tabla 2. Valores promedios de carbono fijado para prácticas agroforestales en diferentes ecozonas	9
Tabla 3. Depósito de carbono en la biomasa aérea de árboles en algunos sistemas agroforestales en Centroamérica	9

CAPITULO 3

Tabla 1. Valores promedios de crecimiento de los arboles y densidades de especies en las parcelas experimentales	23
Figura 1. Secuestro de carbono en el suelo por una pastura (<i>Panicum maximum</i>) sola y con laurel (<i>Cordia alliodora</i>) en regeneración natural en La Fortuna de San Carlos, Costa Rica	24
Figura 2. Distribución del carbono en el suelo por capas y por parcelas en una pastura de <i>Panicum maximum</i> sola y con laurel (<i>Cordia alliodora</i>) en regeneración natural en La Fortuna de San Carlos, Costa Rica	25
Figura 3. Modelos de regresión para la distribución de C en un sistema silvopastoril con pasto (<i>Panicum maximum</i>) y arboles de <i>Cordia alliodora</i> bajo regeneración natural en La Fortuna de San Carlos, Costa Rica	25

CAPITULO 4.

Figura 1. Carbono del suelo y biomasa de raíces finas (materia seca) del pasto (<i>Panicum maximum</i>) solo y con laurel (<i>Cordia alliodora</i>) en regeneración natural en La Fortuna de San Carlos, Costa Rica	38
Figura 2. Biomasa de raíces finas (materia seca) del pasto (<i>Panicum maximum</i>) solo y con laurel (<i>Cordia alliodora</i>) en diferentes capas del suelo en La Fortuna de San Carlos, Costa Rica	39
Figura 3. Biomasa de raíces finas (materia seca) del pasto (<i>Panicum maximum</i>) debajo y junto al macollo en un sistema silvopastoril con laurel (<i>Cordia alliodora</i>) en regeneración natural en La Fortuna de San Carlos, Costa Rica	40

CAPITULO 1

Introducción general

Hay una creciente preocupación por los cambios climáticos y su impacto en las actividades humanas. Los responsables de este cambio son los gases generados por los procesos industriales y actividades agrícolas, que absorben la radiación termica emitida por la superficie de la tierra. El CO₂ es el gas de invernadero más abundante, y contribuye con el 50% del calentamiento global.

La tasa de deforestación en las regiones tropicales es muy elevada, 17 millones de has al año (FAO, 1993) y no solo tiene efectos locales, sino que además contribuye con una cuarta parte de las emisiones de CO₂ y otros gases hacia la atmósfera. En América Latina la emisión neta de carbono entre 1850 y 1985, debido a cambios en el uso de la tierra fué estimado en 30 Pg C (Houghton *et al*, 1991). La fuente principal de estas emisiones fueron las enormes áreas de pasturas degradadas. Las prácticas culturales como labranza, quema y fertilización química ocasionan emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O del suelo y la vegetación hacia la atmósfera.

Una forma de mitigar los efectos del dióxido de carbono además de reducir las emisiones, es “secuestrarlo”, o sea capturarlo y mantenerlo el mayor tiempo posible en la biomasa, el suelo y los océanos. En el primero, esto se logra a traves de la fotosíntesis y en el segundo a traves de la descomposición y mineralización de la materia orgánica. Los bosques son el principal sumidero para el CO₂, sin embargo una hectárea con agroforestería puede secuestrar en promedio 95 Mg C, además de proporcionar bienes y servicios que pueden potencialmente evitar que se deforesten 5-20 ha (Dixon, 1995)

En Costa Rica opera desde 1997, el pago de servicios ambientales que se instituye en la Ley forestal No. 7575. Es un mecanismo que busca compensar a los propietarios de bosques y plantaciones forestales por los servicios que estos prestan a la sociedad. Estos servicios abarcan desde el almacenamiento de carbono en la biomasa hasta la protección de

las fuentes de agua y la biodiversidad (Araya, 1998). En el programa de incentivos de la resolución No.947 (MINAE, 1997), se incluyen dentro de las áreas prioritarias a aquellas que desempeñen la función de sumideros y/o almacenes de carbono, igualmente las áreas de repastos en cualquier etapa de sucesión del bosque. Costa Rica cuenta con cerca de 900 mil has de bosque en áreas protegidas, los cuales tienen almacenado, aprox. 36 millones de toneladas métricas de C. Sin embargo, la estrategia más eficaz para secuestrar carbono es, permitir la regeneración natural (bosques secundarios) y establecer plantaciones forestales (Alfaro-Murillo, 1997).

La regeneración natural es la forma más barata de arborizar las pasturas, sin embargo es necesario manejar los rodales, para mejorar tanto el rendimiento de la pastura como el crecimiento de los árboles. Con el objeto de demostrar el potencial de los sistemas silvopastoriles se cuantificó el carbono secuestrado en el suelo de un pastizal con árboles maderables de *Cordia alliodora* en tres etapas de regeneración natural y en un sitio con pasto guinea (*Panicum maximum*) solamente.

1.1 BIBLIOGRAFIA.

- Alfaro-Murillo, M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en ecosistemas forestales. *Revista forestal centroamericana* 19: 9-12. CATIE, Costa Rica.
- Araya, M.V. 1998. Financiamiento de bosques y plantaciones forestales: pago por servicios ambientales. *Revista forestal centroamericana* 22: 13-20. CATIE, Costa Rica.
- Dixon, R.K. 1995. Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases? *Agroforestry Systems* 31: 99-116.
- FAO, 1993. Forest resources assesement 1990-tropical countries. Forestry paper no. 112. Italia.
- Houghton, R.A.; Skole, D.L y Lefkowitz, D.S. 1991. Changes in landscape of Latin America between 1850 and 1985. II. Net release of CO₂ to the atmosphere. *Forest Ecology and Management* 38: 173-199.
- Ministerio del Ambiente y Energía (MINAE), 1997. Manual de Procedimientos para el pago de servicios ambientales mediante los certificados de abono forestal. Resolución No. 947-MINAE-SINAC-FONAFIFO. Costa Rica.

CAPITULO 2

El calentamiento global y la agroforestería: El potencial de los sistemas silvopastoriles en el secuestro de CO₂.

Resumen

La preocupación general por el aumento en la concentración de dióxido de carbono y su consecuente impacto en el clima, nos obligan a buscar mecanismos para mitigar sus efectos. Además de disminuir el uso de combustibles fósiles, que desde a mediados del siglo pasado es la principal fuente de CO₂, es necesario manejar la vegetación terrestre, no solo para que disminuya su aporte, sino también para que secuestre la mayor cantidad posible de CO₂, y fije el carbono en la biomasa y en el suelo. Los bosques, además de su riqueza biológica, representan un invaluable depósito de carbono que se debe proteger. La creación de nuevas áreas arboladas como los bosques secundarios, las plantaciones y la agroforestería, ayudarían a liberar la presión hacia los bosques maduros, ofreciendo a la población recursos como alimento, material para vivienda, medicinas, energía barata, etc. En este artículo se resalta ese potencial y se propone que los sistemas silvopastoriles también se tomen en cuenta como sumideros de carbono, sobre todo por la extensión que actualmente ocupan en los trópicos.

Abstract

There is a general concern about the increasing concentration of carbon dioxide and its effects on climate. We are force to find ways to reduce the impact. Besides reducing the use of fossil fuel which is the main source of CO₂ since last century, land vegetation needs to be managed not only as to lessen their share as source but to sequester all the carbon as possible and store it in the biomass and the soil. Beside its biological importance, forests are a valuable sink for carbon that should be protected. The establishment of new wooded areas like regenerating forests, plantations and agroforestry would help to reduce the pressure on the primary forests, providing as well additional goods and services for the people, like food, building materials, medicines and cheap fuel. In this article, the potential is underlined and suggesting to account on silvopastoral strategies for storing carbon, specially because the pasture occupy a great amount of land in the tropics.

2.1 EL PROBLEMA DEL CALENTAMIENTO GLOBAL.

La temperatura de la superficie terrestre está determinada por el balance entre la energía que viene del sol y del centro de la tierra, y aquella que se irradia al espacio. Los gases como el CO_2 , el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), los Clorofluorocarbonos (CFC), y el vapor de agua, son transparentes a la energía solar incidente, pero son comparativamente opacos a la radiación que emite la tierra. Altas concentraciones de estos gases en la atmósfera absorberán más calor, aumentando así la temperatura cerca de la superficie.

Las consecuencias del llamado *calentamiento global* pueden llegar lejos: cambios en la precipitación, en el número de días libres de heladas, en la frecuencia y severidad de las tormentas, en el comportamiento y distribución de plantas y animales, y en los procesos de formación del suelo. Existe además, la posibilidad de que el nivel de los océanos pueda subir al derritirse los casquetes polares (Ciesla, 1995). Los efectos del cambio climático podrían tener serias implicaciones en el futuro para la agricultura, la forestería y la pesca, como resultado de alterar los ciclos biogeoquímicos y de la constante pérdida de la biodiversidad (Vitousek, 1994).

De manera natural el bióxido de Carbono (CO_2) se produce por la respiración de las plantas y los microorganismos, la descomposición aeróbica de la materia orgánica, y la actividad volcánica. Es un gas invisible e inodoro; es 1.5 veces más pesado que el aire y solo representa el 0.031% de ese volumen. (Nilsson, 1992). En anteriores periodos de la historia geológica de la tierra los niveles de CO_2 eran más altos; grandes cantidades eran secuestradas en forma de carbón, gas y petróleo durante el carbonífero, y más recientemente en forma de sedimentos calcareos durante los periodos siluriano y ordoviciano.

El problema principal radica en el uso de fuentes de carbono no renovables como son: petróleo, gas, carbón mineral. Estos combustibles fósiles no se regeneran, y al quemarse se suman al contenido total de dióxido de carbono de la atmósfera, este

actualmente se incrementa cada año en 1.5 ppm. Las emisiones anuales de CO₂, tanto por dichos combustibles como por cambios en el uso del suelo, se estimaron en 5.4 ± 0.5 PgC* y 1.6 ± 1.0 PgC, respectivamente (Sunquist, 1993). Se estima que los océanos absorben 2.0 ± 0.8 PgC, y aproximadamente 3.4 ± 0.2 PgC permanece en la atmósfera. El restante 2.0 ± 1.4 Pg de C por año va a un “sumidero oculto”. Se ha sugerido que mucho de esto puede estar residiendo en la biosfera terrestre (Figura 1).

2.2 FUENTES Y DEPÓSITOS DE CO₂ EN LOS ECOSISTEMAS TERRESTRES

2.2.1. La Vegetación

Los árboles actúan como sumideros al absorber el CO₂, por lo consiguiente liberando oxígeno y reteniendo el Carbono en la biomasa, principalmente en forma de madera. La madera contiene un 48% de C en forma de lignina y celulosa. Para secuestrar una tonelada de C, es necesario producir 2.2 toneladas de madera (FWPRDC, 1996). Al quemarse esta, el proceso se revierte, usando oxígeno del aire y carbono almacenado en la madera, para al final liberar CO₂. Los bosques pueden ser tanto sumideros como fuentes de carbono, esto dependiendo de cómo y con qué propósito sean manejados y cómo sean utilizados sus productos (Chaturveni, 1994).

Según Houghton (1994), la mitad de las tierras boscosas taladas anualmente con fines agrícolas y ganaderos, se degradan después de ser aprovechadas por corto tiempo. De no variar el manejo, esta tasa de degradación es de esperarse que aumente en el futuro, en parte debido al aumento de la población, en otra debido a las necesidades de ingreso, y a que las mejores tierras ya han sido ocupadas para otros fines.

Se estima que los cambios en el uso del suelo contribuyen con aproximadamente el 25% del total de gases de invernadero de origen antropogénico. La mayor parte de esta contribución ha sido en forma de dióxido de carbono liberado a la atmósfera como resultado de la deforestación, principalmente en los trópicos, donde cada millón de has., produce un flujo neto de 0.1 Pg C (Brown *et al*, 1996). De continuar las actuales tasas de

*1 Pg = 1 Gt = 10^{15} g; 1 tonelada = 1 Mg

deforestación, el aclareo de la vegetación, se habrá terminado con el bosque tropical en aprox. 100 años (Houghton,1994)

No solo una gran cantidad de C se almacena en la vegetación terrestre, sino que además se intercambia activamente con la atmósfera. Se estima que lo equivalente al contenido total de CO₂ pasa a través de la vegetación cada 7 años, siendo los bosques los responsables del 70% de ese intercambio (Schroeder, 1993). La relación entre los ciclos biogeoquímicos, es altamente dependiente de la distribución de la vegetación. La saturación de Nitrógeno y los cambios en el uso del suelo, están alterando de manera significativa el potencial de los ecosistemas para almacenar carbono a nivel global (Asner *et al.*,1997).

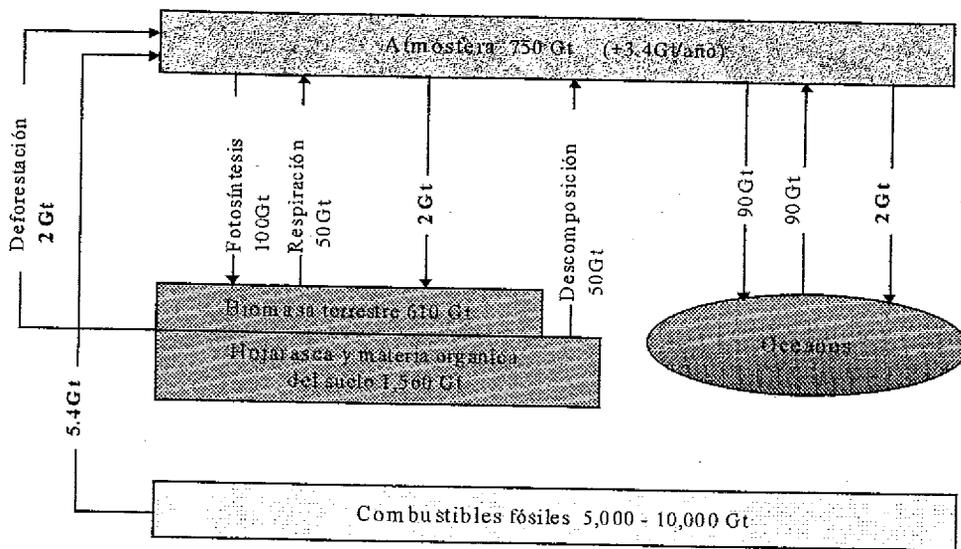


Figura 1. Depósitos y flujos anuales de carbono a nivel global.

Prácticas tendientes a aumentar la cubierta vegetal ó reducir su remoción, incrementan el potencial de captura de carbono. Winjum *et al.*(1992), estimaron que una combinación de reforestación, agroforestería y protección del bosque en 300-600 millones de has disponibles en los trópicos, podrían conservar y secuestrar 36-71 Pg C por más de 50 años. Por su parte, Dixon (1996) estima que utilizando prácticas sostenibles de manejo forestal y agroforestal en 500-800 millones de has de 12 países claves se podría secuestrar potencialmente 0.5-1.5 Pg de C al año.

La capacidad de absorción del C por los árboles está en función de la especie, la tasa de crecimiento, la longevidad, el sitio, el clima, el periodo de rotación, etc. En general, fijan más C los bosques secundarios y las plantaciones jóvenes. Los bosques primarios y las plantaciones maduras alcanzan un estado de equilibrio respecto a la absorción de C, ya que liberan la misma cantidad mediante la descomposición de la madera muerta y de los árboles enfermos (Ciesla, 1995).

Los trópicos poseen un potencial para secuestrar y conservar la mayor cantidad de C (80%), seguido por la zona templada (17%) y la zona boreal (3%) (Tabla 1). De la cantidad asignada a los trópicos, más de la mitad sería lograda por la regeneración (natural y asistida), y por una baja del 20% en la tasa de deforestación. Las plantaciones forestales y la Agroforestería, contribuirían con menos de la mitad del total tropical, pero sin ellos, tanto la regeneración como el freno a la deforestación difícilmente podrían lograrse (Trexler y Haugen, 1995).

Tabla 1. Estimaciones globales de la cantidad de C que podría ser secuestrado y conservado por medio de prácticas de manejo forestal de 1995 a 2050. (Trexler y Haugen, 1995)

Zona climática/ Práctica de mitigación	Superficie Disponibles(10^6 Ha)	C secuestrado y conservado(Pg)	Costo \$/Mg C	Costo total (10^9 \$)
Tropical				
Frenar la deforestación	138	10.8*	2	22
Regeneración natural	217	11.5*	2	22
Plantaciones forestales	67	16.4	7	97
Agroforestería	63	6.3	5	27
Templada				
Plantaciones forestales	115	11.8	6	60
Agroforestería	5	0.7	5	3
Boreal				
Plantaciones forestales	95	2.4	8	17
Total	700	60		247

*basados en valores mínimos biomasa; incluyen 25% más de C por el aporte de raíces, hojarasca y suelo

Los sistemas agroforestales, al aumentar la biomasa, no solo crean sumideros para el carbono en forma de árboles y productos maderables, sino que también ayudan a evitar el agotamiento de los almacenes naturales ya existentes, reduciendo la presión sobre los bosques remanentes. En áreas donde la leña es escasa, la agroforestería puede llegar a

evitar la explotación de los bosques al suplir suficiente energía barata. Si la madera de los árboles es convertida a muebles ó usada en construcción, un 50% de ella, actúa como almacén de carbono hasta su descomposición completa, que puede durar muchos años * (Dixon,1995).

Grainger (1988) estima que en los trópicos 2,080 millones de has se han degradado de alguna manera, y en teoría estarían disponibles para reforestar. Pero, basandose en criterios económicos y ecológicos, propone solo reforestar 621 millones de hectáreas: 36% en Asia, 36% en América Latina y 28% en Africa. El costo para las diferentes opciones forestales (Tabla 1), es en promedio de \$ 5 por tonelada de C, el cual es mucho menor al costo de otras estrategias, por ejemplo: \$ 95 para la energía eólica y \$ 535 para la energía nuclear (Myers, 1991).

Las plantaciones tropicales ofrecen el mayor potencial para absorber CO₂ por unidad de área, sin embargo requieren de ciertas condiciones ambientales que solo pueden garantizarse en áreas relativamente pequeñas. Los sistemas agroforestales acumulan aún menos cantidad de CO₂ en la biomasa aérea, ya que la superficie solo se encuentra parcialmente arbolada, sin embargo, pueden generar un marcado incremento en los ingresos de C debajo del suelo (Burger, 1994).

Según Houghton *et al* (1991), la capacidad promedio anual de secuestro para el trópico americano es de 60 tC/ha. Sin embargo Winjum *et al* (1992) consideran la cifra de 95 tC/ha como el promedio para la agroforestería. Desde el punto de vista del almacenaje de C, el tamaño de los arboles y el número promedio, son decisivos. El espectro de condiciones va desde algunos arboles dispersos hasta rodales densos, y desde soportes vivos para tomate hasta la producción de fustes maderables (Kursten & Burschel, 1993).

→ La cantidad de C secuestrada al año directamente por los árboles, dentro de diferentes sistemas agroforestales va normalmente de 3 a 25 t/ha, y en el caso del Taungya y los Huertos Caseros, estos superan las 50 t./ha. Las cortinas rompevientos, los arboles en

* El autor asume una tasa de descomposición del 2% anual en los trópicos.

linderos y los cercos vivos están en la parte más baja de dicho rango (Kursten y Burschel, 1993). Sin embargo, en los trópicos, la vegetación secundaria en un barbecho de 15 años, puede acumular hasta 100 t/ha. de biomasa (Brown y Lugo, 1990).

Al menos tres categorías de tierras son candidatas apropiadas para implementar sistemas agroforestales: a) tierras degradadas ó improductivas, b) tierras bajo agricultura y pastizales permanentes que podrían ser arborizadas, y 3) tierras en barbecho corto. En los dos primeros casos, donde esta agotado el almacenaje aéreo de C, los incrementos netos varían según las ecozonas (Tabla 2) y sistemas agroforestales (Tabla3).

Tabla 2. Valores promedios de carbono fijado por medio de prácticas agroforestales en diferentes ecozonas (Schroeder, 1994).

<i>Ecozona</i>	<i>Carbono fijado</i> (tC/ha)	<i>Tasa de crecimiento</i> (tC/ha/año)	<i>Ciclo de rotación</i> (años)	<i>N</i>
Semi-árida	9	2.6	5	15
Sub-húmeda	21	6.1	8	15
Húmeda	50	10	5	8
Templada	63	3.9	30	4

Tabla 3. Depósito de carbono en la biomasa aérea de arboles en algunos sistemas agroforestales en Centroamérica (Kursten y Burschel, 1993).

Sistema Agroforestal <i>Especie</i>	<i>Arboles</i> / ha	<i>Rotación</i> (años)	<i>Producción</i> de leña (t/ha)	<i>Tasa de secuestro</i> (tC/ha/año)	<i>Fijación</i> (tC/ha)
Arboles de sombra					
<i>Gliricidia sepium</i>	330	30	101.4	0.7	51.6
<i>Inga densiflora</i>	400	20	42.8	0.5	24.3
<i>Mimosa scabrella</i>	650	2	18.3	2.0	24.9
Plantaciones para leña					
<i>Leucaena leucocephala</i>	3800	5	46.2	2.0	28.9
<i>Eucalyptus saligna</i>	1378	2.5	41.3	3.6	27.0
Bosque secundario					
<i>Miconia lonchophylla</i>	3400	8	54.0	1.4	31.0
<i>Lonchocarpus spp.</i>	7300	3	27.8	2.0	17.9
<i>Lonchocarpus spp.</i>	3400	3	10.6	0.8	7.6
<i>Cassia grandis</i>	1700	3	21.2	1.6	12.3
<i>Guazuma ulmifolia</i>	28250	4	5.2	0.3	5.8
Arboles en potreros					
<i>Alnus acuminata</i>	35	30	18.3	0.1	25.0

2.2.2 El Suelo

↳ En el caso de los bosques tropicales, más de la mitad del C se acumula en el suelo (Dixon *et al*, 1994). El suelo contiene fracciones de carbono con periodos de residencia mayores en relación con la biomasa, por lo que los cambios en estas fracciones tendrían grandes efectos sobre la capacidad de los ecosistemas terrestres para secuestrar carbono a largo plazo (Canadell, *et al*, 1996). A más de un metro de profundidad, los suelos forestales contienen más carbono que la biomasa aérea; hasta el 15% de este carbono se recicla en un lapso de varios años ó hasta décadas. Así, la actividad que afecte los ingresos de carbono a las profundidades del suelo, puede también afectar el almacenamiento neto de C en el suelo (Nepstad *et al.*, 1994). En general, se observó que los bosques secundarios desarrollan más biomasa radicular que las plantaciones (Lugo, 1992).

El contenido de C húmico es el pre-requisito para la productividad de un suelo. La adición de residuos de cosecha muchas veces no es suficiente para mantener el nivel adecuado de C en el suelo, los árboles pueden compensar las pérdidas constantes de C, proporcionando material orgánica adicional al sistema. Toda la materia orgánica eventualmente se incorpora al suelo en forma de hojarasca y raíces muertas, compensando la descomposición a causa de la oxidación microbial. En general, la acumulación de carbono en los suelos está asociado a practicas que conservan suelos más frescos (sombra, cobertura), más húmedos; más fértiles y mejor aireados (Dixon, 1996).

En el trópico húmedo una reserva en el suelo de 35 t/ha de C, bajo un cultivo de maíz se ve reducida a 9 t/ha, en un lapso de 50 años (Young, 1989). Los suelos tropicales pueden llegar a acumular entre 168 y 553 Tg[▲] C/año. Sin embargo, el mayor potencial lo tienen los barbechos, ya que ocupan 250 millones de hectáreas (Lugo y Brown, 1993). La diferencia en el contenido de C de un suelo que solo ha tenido uso agrícola por mucho tiempo, con aquel que ha sido enriquecido con materia orgánica bajo un sistema agroforestal, es la cantidad de C removida de la atmósfera permanentemente, y varían entre 10-50 tC/ha (Kursten y Burschel, 1993).

▲ 1 Tg = 1 Mt = 10¹² g

Que los suelos bajo pastizales sean fuentes ó sumideros netos depende del manejo, pero una aproximación de una parte de las pasturas bajo prácticas de manejo “típicas” ó “ideales, indican que los suelo de la Amazonia brasileña son fuentes de carbono (Fearnside y Barbosa, 1998). Considerando que la mitad de la Amazonia fue convertida en pastizales, este sistema en general emite de 1.9 a 3.4 Pg C durante un período de 35 años, esto representa un aumento en la emisión neta de 2 ppm de CO₂ a la atmósfera., o de 0.28 a 0.56% del total de CO₂ atmosférico (Cerri *et al.*,1995).

2.3 EL APORTE DE LAS PASTURAS AL SECUESTRO DE CO₂ EN EL NEOTRÓPICO

Comparadas con la sabana, las pasturas mejoradas, secuestran la mayor parte del C en las partes más profundas del perfil del suelo, más allá de la capa arable. Este C se encuentra por lo consiguiente menos susceptible a oxidarse, y perderse durante alguna fase de cultivo que haya que hacer en sistemas integrados con pastos. Dichos sistemas deben ser capaces de permitir rotaciones con cultivos anuales y aún contribuir al secuestro de C.

→ En las sabanas de sudamérica, según Fisher *et al.* (1994), los pastos introducidos podían estar secuestrando en el suelo, de 100-507 Mt de C al año. Los autores encontraron que las pasturas de *Brachiaria humidicola* y de *Andropogon gayanus*, contribuyeron mucho más que los pastos nativos al contenido de C del suelo, especialmente al asociarse con alguna leguminosa. La asociación de estas pasturas con *Arachis pintoi* incrementó el secuestro de carbono en 7.8 t /ha, comparado con el pasto solo.

En pastizales *tropicales*, a lo largo de un amplio rango de zonas de vida, hay igual ó más carbono orgánico en el suelo que lo que hay en los bosques adyacentes. Este es el caso → de las pasturas menores de 20 años, donde la alta producción de raíces explican quizás porque las pasturas acumulan tanto C en el suelo. La mayoría de los sitios tenían un 80% más de C que en los bosques a la par (Lugo y Brown, 1993). Después de una conversión del bosque a pastizal en la Amazonia, Cerri *et al.* (1991), encontraron que las pérdidas iniciales en el contenido de C-orgánico del suelo ocurrieron en los primeros dos años debido a que la lixiviación ó pérdida del *humus* original fue más rápido que la reposición por parte de las pasturas jóvenes; después, el contenido de C se restauró al hacerse

reversibles estos dos procesos. La elevada producción de raíces de los pastos podría explicar porque las pasturas pueden ser un sumidero de C.

La proximidad a los árboles y un aumento en la densidad de arboles *Eucalyptus grandis*, redujo el crecimiento de las raíces de la pastura dominada por *Setaria sphacelata*. En la densidad más alta (2150 arboles /ha) se encontró la menor concentración de raíces de pastos. El sistema radicular de los árboles se encontró más profundo y denso a altas densidades de arboles, aunque la longitud total y la biomasa de las raíces producida por árbol disminuyó al aumentar la densidad de arboles. La relación raíz:brote aumentó al disminuir la densidad de arboles debido a una mayor producción de raíces a bajas densidades: 304 y 82 arboles/ha (Eastham y Rose, 1990).

La integración del ganado con plantaciones constituye una alternativa para la producción animal sin necesidad de nuevas tierras. Los animales aprovechan la vegetación del estrato bajo (forraje), reduciendo ó eliminando el uso de herbicidas y el costo del control de las malezas y acelerando el reciclaje de los nutrientes, lo cual suele ser beneficioso para el rodal. Sin embargo, los sistemas integrados no son fáciles de manejar, precisan de cuidado (Sanchez, 1995).

Según el inventario forestal en la Zona Norte de Costa Rica existen 25,000 ha de potreros con árboles aislados. El volumen total de madera de los potreros podría parecer insignificante ($571,500 \text{ m}^3$), sin embargo, el mercado nacional se abastece en gran medida con materia prima proveniente de estos árboles (COSEFORMA, 1995). Cabe señalar que la madera proveniente de potreros tiene un mayor porcentaje de volumen utilizable comparado con la de los bosques. El bajo volumen ($23.6 \text{ m}^3/\text{ha}$), que suman los arboles en potreros, se debe a que gran parte de la regeneración aún no alcanza el dap de 30 cm. En cuanto a crecimiento, los autores del Inventario, les asignaron a estos árboles un Incremento Medio Anual de $0.5 \text{ m}^3/\text{ha}$.

2.4 CONCLUSIONES.

La agroforestería ofrece una amplia gama de prácticas para aprovechar la enorme cantidad de tierras disponibles en los trópicos. El papel de los árboles es crucial para secuestrar y acumular carbono en la biomasa, en el suelo y en los diversos productos maderables. Se pueden lograr reducir continuamente las emisiones de CO₂, como resultado de la sustitución de fuentes de energía y de materiales.

Donde la agroforestería es rentable, el costo de almacenar y conservar el carbono asociado a las practicas de manejo es nulo. La acumulación de carbono orgánico en el suelo es un mecanismo de secuestro con mayor potencial para la agroforestería que el secuestro en la biomasa vegetal. En Costa Rica, existe un potencial para manejar la regeneración natural de árboles en potreros, como un sumidero de carbono sin afectar la producción ganadera.

2.5 BIBLIOGRAFIA.

- Asner, G.P.; Seastedt, T.R.; Townsend, A.R. 1997. The decoupling of terrestrial carbon and nitrogen cycles. *Bioscience* 47 (4): 226-234.
- Brown, S.; Lugo, A.E. 1990. Tropical secondary forests. *Journal of Tropical Ecology*, 6: 1-32.
- Brown, S.; Sathaye, J.; Cannell, M.; Kauppi, P.E. 1996. Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. *Commonwealth Forestry Review* 75 (1): 80-91.
- Burger, D.1994. Reforestation and other forestry CO₂ strategies. *Plant Research and Development* 4: 37-47.
- Canadell, J.G.; Pitelka, F.P.; Ingram, J.S 1996. The effects of elevated CO₂ on plant-soil carbon belowground: A summary and synthesis. *Plant and Soil* 187: 391-400.
- Cerri, C.C.; Bernoux, M.; Feigl, B.J. 1995. Deforestation and use of soil as pasture: climatic impacts. *In: Workshop Interdisciplinary research on the conservation and sustainable use of the amazonian rainforest and its information requirements.* (1995, Brazilia, Brazil). *Proceedings.* Eds. R.Lieberei; C.Reisdorff; A.Dantas Machado. p: 177-186.

- Cerri, C.C.; Volkoff, B.; Andreux, F. 1991. Nature and behaviour of organic matter in soils under natural forest, and after deforestation, burning and cultivation, near Manaus. *Forest Ecology and Management* 38: 247-257
- Ciesla, W.M. 1995. Climate change, forest and forest management. An overview. FAO (Italia). *Forestry Papers* no.126. 128 p.
- Chaturveni, A.N. 1994. Sequestration of atmospheric carbon in India's forest. *Ambio* 23: 460-461.
- COSEFORMA, 1995. Inventario forestal de la región huétar norte. Resúmen de resultados. 2a. ed. San José, Costa Rica. COSEFORMA-MINAE-GTZ.,
- Dixon, R.K.; Brown, S.; Houghton, R.A.; Salomon, A.M.; Trexler, M.C.; Wisniewski, J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- Dixon, R.K. 1995. Agroforestry systems: Sources or sinks of greenhouse gases? *Agroforestry Systems* 31: 99-116.
- Dixon, R.K. 1996. Agroforestry systems and greenhouse gases. *Agroforestry Today* 8 (1): 11-14.
- Eastham, J; Rose, C.W. 1990 Tree/pasture interactions at a range of tree densities in an agroforestry experiment; I. Rooting patterns. *Australian Journal of Agricultural Research* 41: 683-695
- Fearnside, P.M.; Barbosa, R.I. 1998. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management* 108: 147-166.
- Fisher, M.J; Rao, I.M.; Ayarza, M.A.; Lascano, C.E.; Sanz, J.I.; Thomas, R.J.; Vera, R.R. 1994. Carbon storage by introduced deep rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 371: 236-238.
- Forest and Wood Products Research and Development Corporation (FWPRDC). 1996. *Environmental properties of timber*. Brisbane. Australia.
- Grainger, A. 1988. Estimating areas of degraded tropical lands requiring replenishment of forest cover. *International Tree Crops Journal* 5: 31-61.
- Houghton, R.A.; Skole, D.L.; Lefkowitz, D.S. 1991. Changes in landscape of Latin America between 1850 and 1985, 2: Net release of CO₂ to the atmosphere. *Forest Ecology and Management* 38: 173-199.
- Houghton, P.A. 1994. The worldwide extent of land-use change. *BioScience* 44 (5): 305-313.

- Kursten, E.; Burschel, P. 1993. CO₂ mitigation by agroforestry. *Water, Air and Soil Pollution* 70: 533-544.
- Lugo, A.E. 1992. Comparison of tropical tree plantations with secondary forests of similar age. *Ecological Monographs* 62: 1-41.
- ; Brown, S. 1993. Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon. *Plant and Soil* 149: 27-41.
- Myers, N. 1991. Tropical forest: Present status and future outlook. *Climatic Change* 19: 3-32.
- Nepstad, D.C.; de Carvalho, C.R.; Davidson, E.A.; Jipp, P.H.; Lefevre, P.A.; Negreiros, G.H.; da Silva, E.D.; Stone, T.A.; Trumbores, S.E.; Vieira, S. 1994. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of the Amazonian forest and pastures. *Nature* 372: 666-669.
- Nilsson, A. 1992. *Greenhouse earth*. New York, J. Wiley. 219 p.
- Sánchez, M. 1995. Integration of livestock with perennial crops. *World Animal Review* 82 (1): 50-57
- Schroeder, P. 1993. Agroforestry systems: integrated land use to store and conserve carbon. *Climate Research* 3: 53-60.
- 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 70: 89-97
- Sunquist, E.T. 1993. The global carbon dioxide budget. *Science* 259: 934-931.
- Trexler, M.C.; Haugen, C. 1994. *Keeping it green: Evaluating tropical forestry strategies to mitigate global warming*. Washington, D.C., World Resources Institute.
- Young, A. 1989. *Agroforestry for soil conservation*. ICRAF. Science and Practice in Agroforestry no. 4, 276 p.
- Vitousek, P.M. 1994. Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology* 75 (7): 1861-1876.
- Winjum, J.K.; Dixon, R.K.; Schroeder, P.E. 1992. Estimating the global potential of forest and agroforest management practices to sequester carbon. *Water, Air and Soil Pollution* 64: 213-227.

CAPITULO 3

Secuestro de Carbono en el suelo por un sistema silvopastoril con pasto guinea (*Panicum maximum* Jacq) y laurel (*Cordia alliodora* R&P, Oken) bajo regeneración natural en la zona Atlántica de Costa Rica.

Resumen

Los elevados niveles de emisión de CO₂ a la atmósfera están ocasionando cambios en el clima a nivel mundial. Una de las maneras de combatir este problema, además de disminuir las emisiones, es generar sumideros para este gas. La vegetación y el suelo juegan un papel fundamental en el ciclo del carbono. Entre los agroecosistemas importantes, debido a su mayor extensión, que podrían mitigar los efectos de estas emisiones se encuentran los sistemas silvopastoriles que incluyen además del componente ganadero un componente forestal. En potreros de la Zona Atlántica de Costa Rica, la regeneración natural de laurel (*Cordia alliodora* (R&P) Oken) es frecuente. En un estudio de caso se muestrearon de forma sistemática los suelos de tres parcelas con arboles de diferentes edades y otra más sin arboles mediante una rejilla de 3x5m en 24 puntos hasta una profundidad de 50 cm. En suelos relativamente fértiles de esta zona, se determinó que el suelo debajo un potrero con pasto guinea (*Panicum maximum* Jacq) pudo acumular 233 t/ha de carbono, mientras que un suelo un poco menos fértil bajo un sistema silvopastoril con pasto guinea y laurel de regeneración natural entre uno y diez años de edad almacenó 180-200 t/ha de carbono. La densidad de carbono en el suelo disminuyó con la profundidad y también con la distancia al árbol más cercano. La variabilidad de la distribución del carbono aumentó con la profundidad del suelo y en el sistema silvopastoril con la edad de los árboles. Estos primeros resultados indican que un sistema silvopastoril de *C. alliodora* y *P. maximum* en suelos medio fértiles probablemente no incrementa la materia orgánica del suelo, sino más bien puede contribuir al secuestro de carbono por medio de la producción de madera sin disminuir el C del suelo. Para comprobar esta hipótesis se recomienda implementar estudios más detallados que incluyen además diferentes ecozonas, suelos y especies de pasto.

Abstract

Increasing levels of CO₂ emissions into the atmosphere has brought climatic changes globally. One way to face this problem besides cutting down the emissions is to create sinks for this gas. Vegetation and soils play an important role in the carbon cycle. Among the main agroecosystems that could help to mitigate the effects of those emissions because of the large surface they occupy, are the so called Silvopastoral Systems that include livestock and trees. On swards of the Atlantic Zone of Costa Rica, natural regeneration of *Cordia alliodora* (R&P) Oken is frequent. A case study was carried out, using a systematic sampling procedure in four plots: one with pasture only and three with pasture and trees in different stages of natural regeneration. The soil was sampled with a 3x5 grid in 24 points per plot to a depth of 50 cm. On a medium fertile soil under green panic (*Panicum maximum* Jacq) pasture 233 tC/ha could be sequestered down to a depth of 50 cm, while in a slightly less fertile soil under the same grass species associated with trees of *C alliodora* less than 10 years old, 180-200 tC/ha was stored. Carbon density decreased with depth and with distance from the tree. Variability of carbon distribution increased with soil depth and age of the stand. These preliminary results indicate that the soil under silvopastoral regime may not gain more carbon, but their net contribution to carbon sequestration could be in the production of timber, without diminishing the soil carbon content. In order to test this hypothesis, more detailed studies which include other ecozones, soils and grass species are recommended.

3.1 INTRODUCCION

El dióxido de carbono es el principal gas de invernadero que contribuye al cambio climático, acumulándose en la atmósfera y atrapando calor solar. El secuestro de carbono significa la remoción de CO₂ de la atmósfera hacia el suelo, donde es almacenado como parte de la materia orgánica. La materia orgánica del suelo representa un importante almacén de C dentro de la biosfera, estimado en más de 1,400 Gt (1Gt = 10¹⁵ g) a nivel global, casi el doble del que hay en la atmósfera (Post et al, 1982), y puede comportarse tanto como una fuente así como un sumidero para C y nutrientes. El secuestro de carbono en el suelo ha sido señalado como un objetivo importante dentro del manejo de los agroecosistemas (Burke et al., 1995).

La deforestación conduce a una disminución en los contenidos de carbono en el suelo, con la consecuente pérdida de fertilidad y un aumento en las emisiones de los gases de invernadero. Sin embargo se han reportado también aumentos en la reserva de carbono del suelo posterior a la conversión de bosques en pastizales, especialmente en pasturas mejoradas y bien manejadas (Lugo y Brown, 1993; Fisher *et al.*, 1994). Aún así, la descarga neta de C debida a cambios en el uso de la tierra (principalmente deforestación) en los trópicos en los años 80s fué de 1.6 Pg C/año (Houghton, 1996), del cual 0.1-0.3 Pg C/año provino de la descomposición de la materia orgánica del suelo (Detwiler y Hall, 1988). En la zona atlántica de Costa Rica la conversión del bosque a pasturas poco productivas, ha resultado en una pérdida neta de 150-2180 g C/m², dependiendo del tipo de suelo, durante 25 años (Veldkamp, 1994). La pérdida de carbono del suelo luego de la conversión a pastizales es menor (20%) que a terrenos agrícolas (40%), esto importa debido a que las pasturas ocupan una gran extensión en América Latina (Detwiler, 1986; Houghton *et al.*, 1991).

En los trópicos es común el uso de árboles y arbustos para la alimentación animal, para cercas vivas, sombra, rompevientos, etc. Estos sistemas silvopastoriles buscan armonizar a la producción pecuaria con la conservación de los recursos naturales. Un sistema silvopastoril es una opción de producción pecuaria que involucra la presencia de leñosas perennes e interactúa con los componentes tradicionales (forrajeras herbáceas y animales), todos ellos bajo un manejo integral (Pezo e Ibrahim, 1996). X B

Cordia alliodora (Ruiz & Pav.) Oken pertenece a la familia Boraginaceae; es una especie neotropical que se distribuye desde el norte de México hasta el norte de Argentina, generalmente por abajo de 1000 m.s.n.m. Su mejor crecimiento (en altura y forma) se da en suelos bien drenados de textura franca, donde la precipitación anual es mayor a 2000mm (Johnson y Morales, 1972). Es una especie pionera en pasturas degradadas y terrenos agrícolas abandonados. Es muy prolífica y de larga vida, se regenera fácilmente, formando rodales casi puros gracias a la presencia de árboles cercanos, cuyas semillas son dispersadas por el viento (Greaves y McCarter, 1990). Los árboles adultos, incluso en climas no estacionales, pierden sus hojas (caducifolios) durante un periodo de uno ó dos meses

después de la producción de semilla (Boshier y Lamb, 1997). Su abundancia se debe a la costumbre de los agricultores de dejar esta especie en pie al limpiar sus nuevas parcelas y potreros.

El pasto guinea (*Panicum maximum* Jacq) originario de África, es una gramínea perenne de gruesos macollos, forma matas de ~40 cm de diámetro, alcanza más de 2m de altura en la madurez. Tiene la mayor y más completa distribución en el trópico americano que ninguna otra gramínea. Se adapta desde el nivel del mar hasta los 2000 m de altitud. Su productividad es mayor en zonas con precipitación anual de 900-1800 mm. Crece bien en suelos secos de cualquier textura, incluso en suelos arenosos ó ácidos, aunque para producir buen forraje requiere de suelos fértiles. Rinde de 50 a 80 toneladas de materia fresca cortandose cada cuatro a ocho semanas en temporada lluviosa (Skerman y Riveros, 1992). *P. maximum* puede comportarse como una planta de sombra, o sea adaptarse a niveles bajos de intensidad lumínica (Veenendaal *et al.*, 1993) y aún así tener buenos niveles de crecimiento y productividad (Mathew *et al.*, 1992; Wilson, 1996), como además de aumentar la digestibilidad (Deinum *et al.*, 1996) y la cantidad de lombrices en el suelo (Zelada, 1996).

Los niveles de degradación ambiental en Latinoamérica obligan a orientar la política de desarrollo hacia un manejo sustentable de los recursos, en donde el secuestro de carbono sea una razón más para optar por los sistemas agroforestales. Actualmente, la oferta de madera fina proveniente de pastizales manejados con regeneración natural de árboles está aumentando (COSEFORMA, 1995). Además, el bajo precio de la carne obliga a los finqueros a diversificar su producción y a recuperar pasturas degradadas. Este estudio de caso contribuye con información preliminar sobre el suelo en su función como sumidero de carbono bajo un sistema silvopastoril. Se entiende como un primer acercamiento al estudio de secuestro de carbono en sistemas silvopastoriles que sirva para generar algunas hipótesis relevantes para futuras investigaciones, que además busca desarrollar metodologías acordes con las condiciones de la zona de estudio, para medir el carbono secuestrado por los sistemas agroforestales en sus diferentes compartimientos.

3.2 MATERIALES Y METODOS.

3.2.1 Descripción del Sitio

La investigación se realizó en la finca La Guaria a 3 km de La Fortuna de San Carlos, en la Región Norte de Costa Rica. Las coordenadas geográficas son 10°28' Latitud Norte y 84°35' Longitud Oeste. La altitud es de 250 m.s.n.m. Según la clasificación de Holdridge (1996), la zona de estudio pertenece al Bosque muy húmedo Tropical (bmh.T). El clima, según Herrera (1986) es caliente, muy húmedo, con una estación seca corta (<35 días intermitentes con déficit de agua). La precipitación media anual considerada, es de 3,609 mm. La distribución de la precipitación muestra un comportamiento bimodal, con un pico máximo de más de 400 mm por mes registrado durante junio-julio y noviembre-diciembre. El período con menos precipitación es de febrero-abril, siendo marzo normalmente, el mes más seco del año. La temperatura media anual es de 26,1°C.

La topografía que en la zona predomina es el relieve ondulado con depósitos del cuaternario, provenientes del volcán Arenal. Predominan brechas volcánicas de composición andesítica, tobas e ignimbritas, depósitos de lahares finos y gruesos y acumulo de materiales piroclásticos no consolidados como arena, ceniza y lapilli. Se pueden apreciar procesos de acumulación llamados conos aluviales y coluviales. Los primeros corresponden a descargas fluviales depositadas en el área de ruptura de pendientes como en el caso de las llanuras, luego de un largo transporte. Los otros son depósitos de interfluvios que tributan gravitacionalmente su carga al colector principal, el material es aún más heterogéneo y poco clasificado (Castillo Muñoz, 1984). Los suelos en el sitio experimental se clasifican como *Typic Tropofluvent*. (USDA, 1996). Son suelos de reciente formación, con pendientes menores de 25%, de textura gruesa y pH ligeramente ácido, son suelos de baja fertilidad.

La finca La Guaria tiene ganado de doble propósito: leche y carne. Como en muchas otras fincas de la región, las pasturas fueron establecidas hace 50 años, cuando agricultores colonizaron esta zona para dedicarse a la ganadería. Desde entonces se ha venido desmontando sistemáticamente los terrenos y talando los bosques, para abastecer una industria maderera floreciente. Sin embargo, en esta finca, hace 15 años se comenzó a permitir la regeneración natural del laurel (*C. alliodora*). Se maneja los pastos de dos

formas: A los apartos de una manzana (0.7 ha), 50 U.A (unidad animal) entran a pastorear cuatro días mientras que en potreros de 4 ha duran hasta dos semanas. A los potreros se les deja descansar durante cinco semanas antes de volver al pastoreo. El manejo de las pasturas en esta finca no incluye quemas, solo se chapean los potreros cada tres meses.

3.2.2 Muestreo y Mediciones:

Con el objetivo de muestrear diferentes etapas de sucesión en una regeneración natural, se buscaron potreros que tuvieran rodales coetaneos. Se identificaron cuatro parcelas: pasto solo, pasto con árboles pequeños (<3 años, dap: 1-14 cm), pasto con árboles medianos (3-6 años, dap: 15-24 cm) y pasto bajo árboles grandes (>6 años, dap: 25-40 cm). La primera se localizó dentro de un potrero de cuatro hectáreas, a 800 m de las otras tres parcelas, las cuales se encontraban contiguas en apartos de una manzana. En ambos sitios se excavó una calicata de 1x2x1m, para obtener datos del perfil del suelo con fines de clasificación (Anexo 1).

Se realizó un inventario de las parcelas arborizadas durante la época seca (marzo 1998), midiendo el diámetro a la altura del pecho[∅] (DAP), altura total y diámetro de copa (excepto en la parcela con árboles pequeños) de veinte árboles los cuales formaban el rodal dentro de la parcela. Se elaboró un croquis para cada parcela (Anexo 2), donde se ubicó cada árbol por medio de coordenadas cartesianas. El equipo usado para las mediciones de los árboles fueron: el clinómetro y la cinta métrica para altura total, la cinta diamétrica para el DAP, y la brújula y cinta métrica para las coordenadas.

Se realizó un muestreo sistemático del suelo con una rejilla de amplitud 3x5m, dentro de un área de 20 x 20m en cada una de las parcelas. Se contó el número de matas de pasto en 10 m². En cada intersección de la rejilla (24 puntos), se tomó muestras de suelo a cuatro profundidades: 0-10, 10-20, 20-30 y 30-50cm. La colocación del área de muestreo en el campo siguió los siguientes criterios: uno, debería estar por lo menos a cinco metros de las cercas vivas, debería de contener al menos diez árboles de la clase diamétrica representativa y se procuró centrar la rejilla lo mejor posible para tener árboles alrededor.

[∅] a 1.3 m del suelo.

Para obtener las muestras se utilizó un barreno de acero, que consiste de un cilindro de 8 cm. de diámetro por 25 cm de largo, dentado en la base y con un émbolo en su interior que sirve para descargar el suelo. El cilindro está sujeto a un mango de un metro de largo, dentro del cual se encuentra una varilla y un engrane (piñón) que con ayuda de una manivela permiten mover el émbolo para extraer la muestra entera sin destruirla. La cabeza del mango está reforzada y tiene un agujero para colocar una varilla que permite jalar el barreno ya clavado en el suelo. Para introducir el barreno en el suelo se usó un mazo de plástico que absorbe los golpes.

Las muestras de suelo se guardaron en el laboratorio a 5°C mientras esperaban ser procesadas. Al día siguiente, de cada una de las muestras se tomó una submuestra de suelo de 20g, para la determinación del carbono orgánico por el método de Walkley-Black, el cual proporciona una medida de las sustancias orgánicas oxidables (Nelson and Sommers, 1982).

3.2.3 Análisis de Datos

El carbono almacenado en el suelo, se presenta como valores promedios con los intervalos de confianza respectivos en t/ha ó en g/50cm², lo que corresponde al área muestreado en cada punto de la rejilla, y g/l de suelo, que corresponde a la densidad de carbono en el suelo. Se compararon los sistemas pasturas solas y asociadas con laurel en cuanto al contenido de carbono en el suelo consciente de la limitación que primero, el manejo de la pastura y las condiciones de suelo en pasto puro y sistema silvopastoril no son iguales, segundo, que no se cuenta con repeticiones y tercera, que el muestreo sistemático solamente provee una estimación conservativa de los parámetros de la distribución de probabilidad. Se probó un modelo de regresión lineal multivariado, con el objetivo de detectar una relación entre el carbono del suelo secuestrado hasta una profundidad de 50 cm con las variables biomasa de raíces finas, distancia a los tres árboles más cercanos y sus medidas respectivas: dap, altura total, utilizando el procedimiento "stepwise".

Por medio de tablas de volumen elaboradas por Somarriba y Beer (1986) para laurel, fué calculado el volumen de madera por árbol, este se multiplicó por la densidad

promedio de árboles en una hectárea (Tabla 1), obteniéndose así el volumen promedio de madera por hectárea. La cantidad de carbono almacenado en la madera, se calculó para cada parcela multiplicando los valores anteriores por el factor de 0.25 que toma en cuenta tanto la densidad de la madera (g/cm^3) como el % de C (peso seco) en la biomasa, ambos reportados como 0.5. Los datos originales de materia orgánica del suelo fueron divididos entre 1.72 para obtener las unidades de carbono. Todas las pruebas estadísticas se evaluaron con una $P < 0.05$.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Crecimiento de las Especies

Las dimensiones de los árboles de laurel fueron en promedio: 30.0, 17.8 y 7.8 cm de DAP, y 22.7, 15.2 y 6 m de altura total para árboles para cada una de las etapas de sucesión. En la parcela con árboles menores de tres años los árboles se ubicaron en la clase diamétrica de 1 a 14 cm, la de árboles de entre tres y siete años correspondió a la clase de 15-24 cm y la parcela con árboles mayores de siete años se le asignó la clase de 25 a 40 cm (Tabla 1). La cantidad de carbono almacenada en el fuste por los árboles grandes resultó tres veces mayor que la almacenada en los árboles medianos, estos a su vez contienen casi cuatro veces más C que los árboles pequeños (26.8: 8.8: 2.3 t/ha respectivamente). Las densidades de los árboles en las parcelas silvopastoriles disminuyeron en un 30% al aumentar la edad de <3 a >7 años. La densidad de macollos del pasto guinea es más alto en pasto puro que en las parcelas con árboles (un 20% en comparación con la parcela con árboles pequeños). Aumentando el crecimiento de los árboles se reduce la densidad de macollos en un 40%, comparando pasto puro y pasto con árboles grandes.

Tabla 1. Valores promedio de crecimiento de los árboles y densidades de especies en las parcelas Experimentales

Parcelas:	Edad (años)	DAP (cm)	Altura total (m)	Volumen (m^3)*	Laurel Árboles/ha	Guinea Plant./ha	Área basal (m^2/ha)	Volumen m^3/ha
1. pasto puro						9822		
2. árboles pequeños	< 3	7.8	6.0	0.05	180	8086	0.9	9.36
3. árboles medianos	3 a 7	17.8	15.2	0.23	153	7827	3.9	35.19
4. árboles grandes	> 7	30.0	22.7	0.86	125	6000	8.8	107.50

* Tablas de volumen (Somariba y Beer, 1986)

3.3.2 Secuestro de Carbono en el Suelo

→ La parcela sin árboles presentó un promedio de carbono secuestrado en el suelo más alto que cualquiera de las tres parcelas con árboles (Figura 1). Las parcelas arborizadas presentaron mayor variación que el pasto puro, sobre todo fué mucho más en las parcelas con árboles grandes y medianos. La parcela con árboles pequeños no pareció diferir realmente de las otras dos respecto a su promedio de carbono en el suelo.

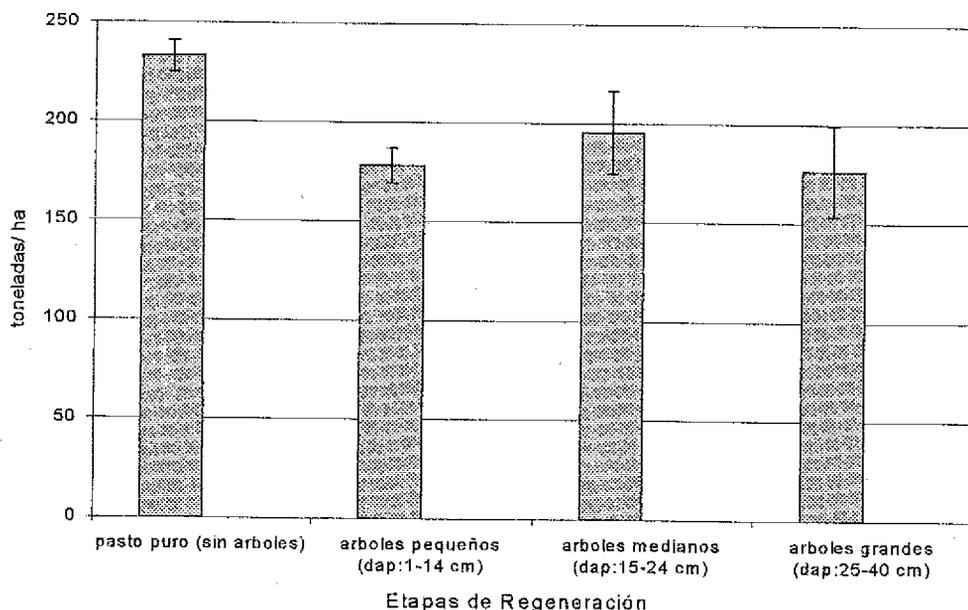


Figura 1. Secuestro de carbono en el suelo por una pastura (*Panicum maximum*) sola y con laurel (*Cordia alliodora*) en regeneración natural en La Fortuna de San Carlos, Costa Rica. Promedios con intervalos de confianza (95%).

→ En promedio la densidad de carbono en el suelo disminuyó con la profundidad en todas las parcelas (Figura 2). En todas las capas la parcela sin árboles, tuvo mayor densidad de carbono en el suelo. En la primera capa (0-10 cm), las parcelas con árboles mostraron sucesivamente menor promedio de densidad de carbono con respecto a la parcela sin árboles, sin embargo en las tres capas subyacentes la parcela con árboles medianos tuvo mayor densidad de carbono que las otras dos con árboles. En la tercera capa la mayor acumulación de carbono en el suelo de la pastura fué más evidente que en las otras capas. Los intervalos de confianza de los promedios indican mayor variabilidad de los datos de carbono en el suelo en las parcelas con árboles medianos y grandes.

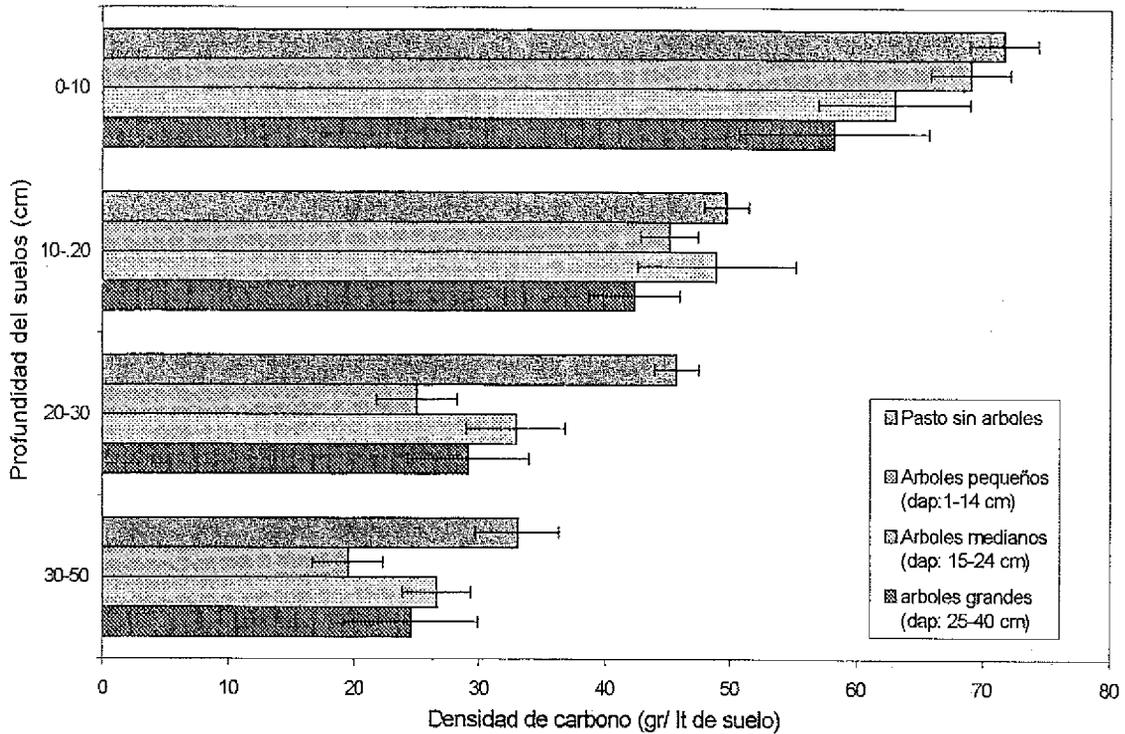


Figura 2. Distribución del carbono en el suelo por capas y por parcelas en una pastura (*Panicum maximum*) sola y con laurel (*Cordia alliodora*) en regeneración natural en La Fortuna, San Carlos, Costa Rica. Promedios con intervalos de confianza (95%).

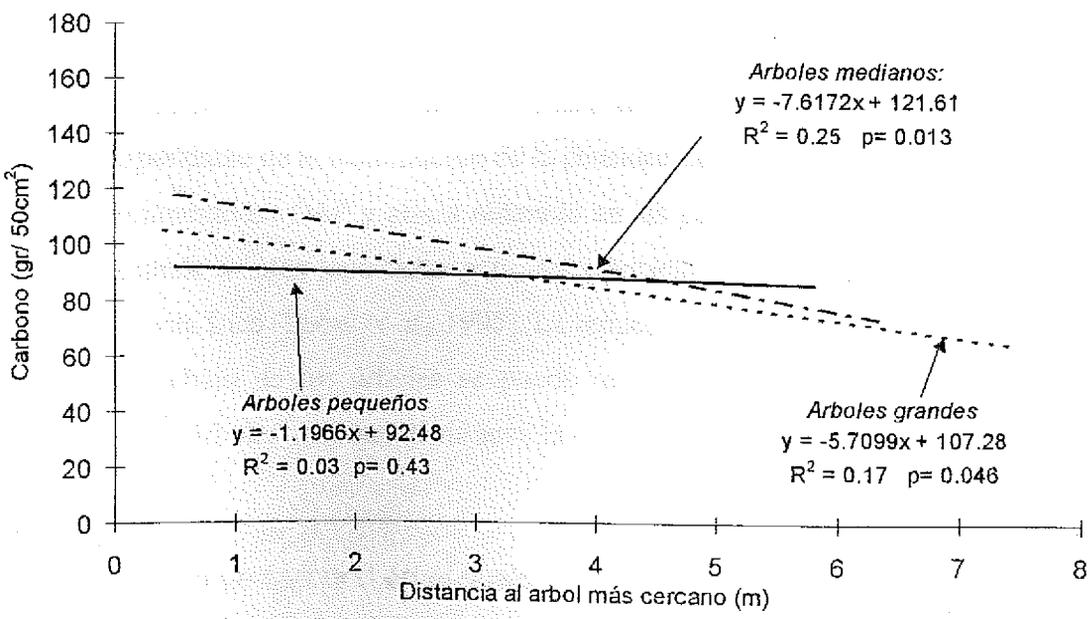


Figura 3. Modelos de regresión para la distribución sistema silvopasteril con pasto (*Panicum maximum*) y arboles de *Cordia alliodora* bajo regeneración natural en La Fortuna de San Carlos, Costa Rica.

El modelo de regresión lineal resultó únicamente significativo para la relación entre carbono del suelo y la variable *distancia al árbol más cercano* en las parcelas con árboles medianos y grandes. Resulta que la cantidad de carbono de suelo encontrado en un punto de muestreo en una parcela con árboles medianos y grandes aumentó mientras estuvo más cerca a un árbol. En la parcela con árboles pequeños no se pudo comprobar una influencia de los árboles sobre la acumulación de carbono en el suelo. Para las demás variables como biomasa de raíces finas, distancia al segundo árbol, distancia al tercer árbol y sus respectivos DAPs y alturas no se pudieron encontrar relaciones significativas con el carbono del suelo en ninguna de las parcelas con árboles. X B

3.4 DISCUSION

3.4.1 Crecimiento de las Especies

La baja densidad de los árboles en todas las parcelas se debe a que la regeneración natural de estos no es uniforme en todo el terreno, sino se da por zonas o parches dentro del potrero. Aún sin manejo silvicultural de los rodales (raleo), las clases diamétricas asignadas a las tres parcelas silvopastoriles demuestran un rango relativamente estrecho para cada grupo de edad. Posiblemente se debe al pastoreo y las chapias del pasto frecuentes que no dejan regenerar muchos árboles jóvenes en cuanto ya estén establecidos rodales en la parcela. Principalmente la cosecha de los árboles maduros (DAP > 40cm) puede ser responsable de la disminución de la densidad de los árboles en cuanto aumenta la edad. El crecimiento en DAP y altura obtenido en las parcelas con árboles de tres a siete años corresponde a datos reportados para una plantación pura de laurel de cinco años en Talamanca, Costa Rica (Lucas *et al.*, 1995). La reducción de la densidad de los macollos de *P. maximum* debajo de los árboles se puede relacionar con la sombra y competencia generada por los árboles. Así que disminuye la densidad del pasto con el crecimiento de los árboles. rsc

3.4.2 Secuestro de carbono en el suelo

En el sistema silvopastoril el suelo almacenó mayor cantidad de carbono que la madera del fuste (Tabla 1, Figura 1), primero porque la densidad de árboles es baja

comparada con un bosque o una plantación, en donde la mitad del C en el ecosistema se encuentra en la biomasa aerea (Dixon *et al.*, 1994). Segundo, las pasturas mejoradas en los sistemas silvopastoriles, adicionan carbono por medio de la descomposición rápida de sus raíces. La cantidad de carbono secuestrada en el suelo por las parcelas con árboles es similar a 179 t/ha, reportada para un oxisol con un bosque húmedo tropical en San Carlos, Venezuela (Tiessen *et al.*, 1994). Los valores similares de carbono en el suelo para las parcelas arborizadas, sugieren que la ganancia neta de carbono de este sistema está en la madera de los árboles y no se ve afectada la reserva del suelo. Como madera de construcción el carbono almacenado en la madera sigue secuestrado por muchos años, aún cuando está extraído de las parcelas (Schroeder, 1992).

→ La diferencia en contenido de carbono entre la pastura sola y la pastura con árboles pudo ser causado por una diferencia en la fertilidad del suelo en ambos sitios ya que la primera tuvo en todas las capas porcentajes más altos de nitrógeno total que esta última. Además la densidad aparente del suelo fué siempre mayor en el sitio con árboles (Anexo 1). Las anteriores limitantes pueden afectar el crecimiento de las raíces del pasto y su tasa de descomposición. La composición química del suelo puede ser más importante en la determinación de la producción de materia orgánica que por ejemplo el clima (Vogt *et al.*, 1996). Estas limitantes son probablemente el resultado del diferente manejo de la pastura y de las parcelas con árboles, debido a que las cargas animales fueron mayores en el sitio con árboles que en la parcela con pasto solo. Lo anterior tuvo efecto en la densidad aparente del suelo debajo de los 20 cm de profundidad, que al ser alta no permitió el crecimiento adecuado de las raíces. Además tuvo una capa entre 20 y 30cm de profundidad con 90% de arena y con baja fertilidad que a su vez limita el crecimiento de raíces (Anexo 1).

La distribución del carbono en el suelo también refleja una posible relación con la densidad de los macollos, que en las parcelas arboladas disminuyó conforme avanzó la edad (Tabla 1). La diferencia en contenido de carbono entre pasto puro y las demás parcelas fué de 20%, y el número de macollos disminuyó en esa misma proporción para las parcelas con árboles pequeños y medianos. Una mayor diferencia se ve entre la parcela sin árboles y árboles grandes probablemente por efecto del sombramiento y tamaño de los árboles, que

afectó la densidad de los macollos. Zelada (1996) observó una reducción en el desarrollo radicular en el pasto a medida que disminuye la radición lumínica, y además se inhibe la formación de nuevos vástagos.

En la parcela con pasto puro, a pesar de que el carbono disminuyó con la profundidad, la poca variabilidad a lo largo del perfil significa una uniforme distribución de la materia orgánica y nutrientes. Lo anterior está relacionado con las condiciones favorables del suelo, el cual no tuvo, como en el sitio con árboles, una capa compactada. La presencia de los árboles de mayor tamaño aumenta la variabilidad de carbono aun más con la profundidad (Figura 2). Lo anterior es consecuente con los resultados de las regresiones multivariadas para las parcelas con árboles medianos y grandes (Figura 3), que indican un aumento en la cantidad de carbono al disminuir la distancia al árbol más cercano.

3.5 CONCLUSIONES

Este estudio de caso sobre el secuestro de carbono en el suelo de un sistema silvopastoril con *P. maximum* y *C. alliodora* de regeneración natural indica, considerando todas las limitaciones de un estudio piloto, que en suelos medio fértiles y bien drenados este sistema tiene un potencial de acumular carbono en la madera del fuste y seguramente otros compartimentos no medidos en este estudio como raíces gruesas o ramas, sin disminuir el carbono en el suelo durante los primeros diez años de la regeneración. La madera producida además de generar ingresos para el finquero, puede almacenar el carbono por muchos años si está utilizado como madera de construcción.

Este primer acercamiento al tema del secuestro de carbono en un sistema silvopastoril generó además la hipótesis, que el carbono del suelo bajo pasto (*P. maximum*) se reduce hasta cierto nivel cuando se permite la regeneración natural de *C. alliodora*, el cual se mantiene hasta la cosecha de los árboles. Debido a las diferencias entre el manejo del pasto puro y las parcelas arborizadas y por parte a los suelos correspondientes, los datos de este estudio no permiten una conclusión definitiva sobre este aspecto. Habría que dar seguimiento a las parcelas de observación establecidas para poder evaluar cambios en el suelo sobre el tiempo. En especial se prestaría la parcela de pasto puro que se podría

aprovechar para implementar un experimento que estudie el efecto de la regeneración natural de *C. alliodora* sobre el secuestro de carbono en el suelo a largo plazo. Con el objetivo de poder aplicar los resultados a una región más amplia, además sería recomendable incluir otros suelos, especies de pasto y ecozonas en el estudio.

3.6 BIBLIOGRAFIA

- Boshier; D.H; Lamb, A.T. 1997. *Cordia alliodora*: Genética y Mejoramiento de árboles. Tropical Forestry Papers 36, Oxford Forestry Institute. 100 p
- Burke, I.C.; Elliot, E.T.; Cole, C.V. 1995 Influence of microclimate, landscape position and management on soil organic matter in agroecosystems. *Ecological Applications* 5: 124-131.
- Castillo Muñoz, R. 1984. Geología de Costa Rica. Una sinopsis. Universidad de Costa Rica, San José. p. 55-59.
- COSEFORMA, 1995. Inventario Forestal de la Región Huétar Norte. Resumen de resultados. 2a. edición. COSEFORMA-MINAE-GTZ, San José, Costa Rica.
- Deinum, B.; Sulastri, R.D.; Zeinab, M.H.J. y A. Maassen. 1996. Effects of light intensity on growth, anatomy and forage quality of two tropical grasses (*Brachiaria brizantha* and *Panicum maximum* var. *trichoglume*) . *Netherlands Journal of Agricultural Science* 44: 111-124
- Detwiler, R.P. 1986. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils. *Biogeochemistry* 2: 67-93.
- Detwiler, R.P.; Hall, C.A.S. 1988. Tropical forest and the global carbon cycle. *Science* 239: 42-47.
- Dixon, R.K.; Brown, S.; Houghton, R.A.; Salomon, A.M.; Trexler, M.C.; Wisniewski, J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263: 185-190.
- Fisher, M.J; Rao, I.M.; Ayarza, M.A.; Lascano, C.E.; Sanz, J.I.; Thomas, R.J.; Vera, R.R. 1994. Carbon storage by introduced deep rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 371: 236-238.
- Greaves, A.; McCarter. 1990. *Cordia alliodora*: a promising tree for tropical agroforestry. Oxford Forestry Institute. Tropical Forestry Papers 22, 37 p.
- Herrera, W. 1986. El clima de Costa Rica. vol.2. Universidad Estatal a Distancia. San José. Costa Rica. 118 p.

- Holdridge, L.R. 1996. Ecología basada en zonas de vida. IICA, San José, Costa Rica. 216p.
- Houghton, R.A. 1996. Converting terrestrial ecosystems from sources to sinks of carbon. *Ambio* 25 (4): 267-278
- Houghton, R.A.; Skole, D.L.; Lefkowitz, D.S. 1991. Changes in the landscape of Latin America between 1850 and 1985.II. Net release of CO₂ to the atmosphere. *Forest Ecology and Management* 38: 173-199
- Johnson, P.; Morales, R. 1972. A review of *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken. *Turrialba* 22 (2): 210-220.
- Lucas C.; Beer J.; Kapp G. (1995) Reforestación con maderables. Sistemas agrosilviculturales vs plantaciones puras en Talamanca, CR. Resultados agrícolas y forestales. Serie Técnica Informe Técnico 243, CATIE, Turrialba, CR
- Lugo, A.E.; Brown, S. 1993. Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon. *Plant and Soil* 149: 27-41.
- Mathew, T.; Mohan Kumar, B.; Suresh Babu, K.V.; Umamaheswaran, K. 1992. Comparative performance of four multipurpose trees associated with four grass species in the humid regions of Southern India. *Agroforestry Systems* 17: 205-218.
- Pezo, D.; Ibrahim, M. 1996. Sistemas silvopastoriles: una opción para el uso sostenible de la tierra en sistemas ganaderos. En: Primer Foro Internacional sobre "Pastoreo Intensivo en Zonas Tropicales". Veracruz, México. 7-9 noviembre 1996. FIRA-Banco de México. Morelia, 39 p.
- Post, W.H.; Emanuel, W.R.; Zinke, P.S.; Stangenberger, A.G. 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 298: 156-159.
- Schroeder, P. 1992. Carbon storage potential of short rotation tropical tree plantations. *Forest Ecology and Management*, 50: 31-41
- Skerman, P.J.; Riveros, F. 1992. Gramíneas tropicales. Colección FAO: Producción y protección vegetal no.23. Roma
- Somarriba, E.; Beer, J. 1986. Dimensiones, volúmenes y crecimiento de *Cordia alliodora* en sistemas agroforestales Serie Técnica. Informe Técnico #238. 29 p.
- Tiessen, H.; Cuevas, E.; Chacón, P. 1994. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature* 371: 783-785.
- USDA, 1996. Keys to Soil Taxonomy. 7th ed. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 644 p.

- Veenendaal, E.M.; Shushu, D.D.; Scurlock, J.M. 1993. Responses to shading of seedlings of savanna grasses in Botswana. *Journal of Tropical Ecology* 9: 213-229.
- Veldkamp, E. 1994. Organic Carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. *Soil Science Society of America Journal* 58: 175-180
- Vogt, AK; Vogt, DJ; Palmiotto, PA; Boon, P; O'Hara, J; Asbjorsen, H. 1996. Review of root dynamics in forested ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant and Soil* 187: 159-219.
- Wilson, J.R. 1996. Shade-stimulated growth and N uptake by pasture grasses in a subtropical environment. *Australian Journal of Agricultural Research* 47: 1075-1093.
- Zelada, S.E. 1996. Tolerancia a la sombra de especies forrajeras herbáceas en la zona Atlántica de Costa Rica. Tesis Mg.Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica.

CAPITULO 4

Distribución de raíces finas y su aporte al secuestro de carbono en el suelo por un sistema silvopastoril con *Panicum maximum* Jacq y *Cordia alliodora* (Ruiz&Pav) Oken en regeneración natural en la zona Atlántica de Costa Rica.

Resúmen.

La distribución de raíces es importante en los sistemas agroforestales. De ellas dependen procesos como el ciclo de nutrientes, el flujo de agua y el secuestro de carbono. Se estudió la producción y distribución de raíces finas en un sistema silvopastoril con pasto guinea (*Panicum maximum*) bajo regeneración natural de árboles maderables (*Cordia alliodora*), con el objetivo de encontrar una relación con el contenido de carbono del suelo. Se muestrearon de forma sistemática los suelos de tres parcelas con árboles de diferentes edades (<3, 3-7, >7 años) y otra más sin árboles mediante una rejilla de 3x5m en 24 puntos hasta una profundidad de 50 cm. El aporte de biomasa de raíces finas al "pool" de C en el suelo fue menor del 1%. La mitad de las raíces finas se encontró en los primeros 10 cm de profundidad. Hubo un aumento significativo en la presencia de raíces finas del árbol en todas las capas, conforme avanza la sucesión natural. La presencia de raíces finas del pasto no parece disminuir al aumentar la edad de los árboles. Esta condición podría explicar la similitud con el comportamiento del C orgánico del suelo. Debajo de las matas del pasto se encontró cuatro veces más biomasa de raíces finas del pasto, que junto a los macollos. El pasto guinea puede mantener una cantidad de biomasa en raíces finas que garantizó su crecimiento adecuado aún en competencia fuerte con las raíces finas del árbol. En un suelo de fertilidad media, con buen drenaje y buena estructura, *C alliodora* se regeneró exitosamente debido al buen desarrollo de las raíces finas aún en competencia con las del pasto (*P. maximum*)

Abstract

Root distribution is very important in agroforestry systems as nutrient cycling, water flow and carbon sequestration depends on it. In order to determine a relationship between fine root biomass and soil carbon, the fine root biomass and distribution in a silvopastoral

system with panic grass (*Panicum maximum*) and natural regenerated trees of *Cordia alliodora* were studied. A systematic sampling procedure was applied in four plots: one without trees and three plots with trees of increasing age (<3, 3-7, >7 years). The soil was sampled with a 3x5m grid in 24 points per plot to a depth of 50 cm. The carbon stored in fine root biomass was less than one percent of that found in the soil. About half of the total fine root biomass was found within the top 10 cm of soil. Tree fine root biomass increased with stand age. Fine root biomass of grasses did not seem to decrease as the stand grew older. This condition could explain the resemblance with the distribution of soil organic carbon. Four times more fine root biomass was found just below the pasture plant as compared to the amount found next to it. The grass was able to maintain certain amount of fine root biomass to keep a regular yield even in a strong competition with the fine roots of the tree. On medium fertile, well-drained and fairly structured soils *C. alliodora* is established successfully due to its extensive fine root development, even with strong competition with the roots of *P. maximum*.

4.1 INTRODUCCIÓN

La conversión de los bosques a terrenos agrícolas y otros cambios en el uso de la tierra están liberando hacia la atmósfera cerca de 2 Gt de carbono al año (Siegenthaler y Sarmiento, 1993). La tasa de deforestación anual se ha estimado en 17 millones de hectáreas, la mayoría en los trópicos (FAO, 1993). Al mismo tiempo pero a menor ritmo, las tierras agrícolas se están abandonando y están siendo colonizadas por árboles. Estas tierras pueden constituir un considerable sumidero de carbono (Brown y Lugo, 1990). El impacto de la deforestación y la fragmentación sobre la biodiversidad, puede aminorarse si los finqueros mantienen manchones de árboles en sus potreros, ya sea sembrándolos o permitiendo su regeneración natural (Harvey *et al.*, 1998). Este tipo de manejo es un ejemplo de un "Sistema silvopastoril" el cual integra especies leñosas y pastos con animales, con el objeto de aprovechar sus interacciones.

Los árboles de sucesión temprana, como *Cordia alliodora* (Ruiz & Pavon) Oken, tienen muchas características fisiológicas que les permiten colonizar fácilmente los lugares abiertos y perturbados (Bazzaz, 1996). *C. alliodora* es un árbol alto, delgado, de copa

angosta, rala y abierta, con autopoda y mínima bifurcación, formando un fuste de 15-20m de altura. (Boshier y Lamb, 1997). En la zona de distribución natural de Costa Rica, los arboles de *C. alliodora* constituyen una característica conspicua del paisaje, los troncos blancos rectos, aislados que se destacan entre los matorrales, así como en los potreros y terrenos agrícolas (Tschinkel, 1965). Cuando las condiciones edáficas son favorables desarrolla una raíz principal grande y profunda, y con raíces laterales bien desarrolladas (CONIF, 1988). Es una especie que combina calidad y alto valor comercial en su madera, por eso es ampliamente utilizada por finqueros en plantaciones y en sistemas agroforestales, tanto en lugares donde es nativo como en donde es exótico (Greaves y McCarter, 1990).

En la zona norte de Costa Rica es común la regeneración de laurel en pastizales de guinea (*Panicum maximum* Jacq). Originario de África, es una gramínea perenne de gruesos macollos, forma matas de ~40 cm de diámetro, alcanza más de 2m de altura en la madurez. Tiene la mayor y más completa distribución en el trópico americano que ninguna otra gramínea. Se adapta desde el nivel del mar hasta los 2000 m de altitud. Resiste al pastoreo y es muy apetecida por el ganado. *P. maximum* germina bien bajo la copa de los árboles debido a que está protegido de las altas temperaturas que reducen drásticamente su sobrevivencia. (Kennard y Walker, 1973). A su vez, el tipo de crecimiento “amacollado” del pasto guinea, favorece la germinación y ofrece una buena protección a las plántulas de laurel (obs.pers).

El conocimiento sobre la distribución de las raíces es importante en los procesos como flujo de agua hacia la atmósfera y mantos freáticos, descomposición de la materia orgánica, el secuestro de carbono y el ciclo de nutrientes. En el suelo se lleva a cabo el 60-80% de la producción primaria neta, y en su mayoría es realizada por las raíces finas, las cuales tienen un rango de vida que va desde semanas a hasta años, dependiendo de la especie y las condiciones ambientales (Bloomfield *et al.*, 1996). Las raíces gruesas pueden vivir mucho más, en algunos casos llegan a tener la misma edad que el tallo de la planta.

El objetivo de este estudio fué la cuantificación de la biomasa de las raíces finas en un sistema silvopastoril y en un pasto puro, con el fin de encontrar una relación entre la distribución de raíces finas de ambas especies y la distribución de C en el suelo.

4.2 MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1 Descripción del Sitio

La investigación se realizó en la finca La Guaría a 3 km de La Fortuna de San Carlos, en la Región Norte de Costa Rica a 10°28' N y 84°35' W y a 250 m.s.n.m. La zona de estudio pertenece al Bosque muy húmedo Tropical (Holdridge, 1996). El clima es caliente, muy húmedo, con una estación seca corta (Herrera, 1986). La precipitación media anual es de 3,609 mm, y la temperatura media anual es de 26,1°C. El período con menos precipitación es de febrero-abril, siendo marzo normalmente, el mes más seco del año.

La topografía que en la zona predomina es el relieve ondulado con depósitos del cuaternario, provenientes del volcán Arenal. Predominan brechas volcánicas de composición andesítica, tobas e ignimbritas, depósitos de lahares finos y gruesos y acumulo de materiales piroclásticos no consolidados como arena, ceniza y lapilli. Se pueden apreciar procesos de acumulación llamados conos aluviales y coluviales (Castillo Muñoz, 1984). Los suelos en el sitio experimental se clasifican como *Typic Tropofluvent*. (USDA, 1996). Son suelos de reciente formación, con pendientes menores de 25%, de textura gruesa y pH ligeramente ácido, y de baja fertilidad.

Como en muchas otras fincas de la región, las pasturas fueron establecidas hace 50 años, cuando agricultores de San Carlos colonizaron esta zona para dedicarse a la ganadería. Desde entonces se ha venido desmontando sistemáticamente los terrenos y talando los bosques, para abastecer una industria maderera floreciente. Sin embargo, en esta finca, hace 15 años se comenzó a permitir la regeneración natural del laurel (*C. alliodora*) y del cedro (*Cedrela odorata*) en los potreros, así como de algunos árboles de cítricos que sirven de sombra y fuente de alimento para el ganado. Tiene además zonas de charral y de bosque secundario a lo largo de los arroyos.

Existen problemas de invasión del pasto ratana (*Ischaemum ciliare*), el cual se controla con aplicaciones esporádicas de herbicidas. La finca se maneja con un sistema de producción de doble propósito: leche y carne. A los apartos de una manzana (0.7 ha), 50 U.A (unidad animal) entran a pastorear cuatro días mientras que en potreros de 4 ha duran hasta dos semanas. A los potreros se les deja descansar durante 5 semanas antes de volver al pastoreo. El manejo de las pasturas en esta finca no incluye quemas, solo se chapean los potreros cada tres meses.

4.2.2 Muestreo y Mediciones

Con el objetivo de muestrear diferentes etapas de sucesión en una regeneración natural, se buscaron potreros que tuvieran rodales coetaneos. Se identificaron cuatro parcelas: pasto solo, pasto con arboles pequeños (<3 años, DAP¹: 1-14 cm), pasto con arboles medianos (3-7 años, DAP:15-24 cm) y pasto bajo arboles grandes (>7 años, DAP: 25-40 cm). La primera se localizó dentro de un potrero de cuatro hectáreas, a 800 m de las otras tres parcelas, las cuales se encontraban contiguas en apartos de una manzana. En ambos sitios se excavó una calicata de 1x2x1m, para obtener datos del suelo con fines de clasificación. (Anexo 1).

Se realizó un inventario de las parcelas arborizadas durante la época seca (marzo, 1998), midiendo el (DAP), altura total y diámetro de copa (excepto en la parcela con arboles pequeños) de veinte arboles los cuales formaban el rodal dentro de la parcela. Se elaboró un croquis para cada parcela (Anexo 2), donde se ubicó cada árbol por medio de sus coordenadas cartesianas. El equipo usado para las mediciones de los arboles fueron: el clinómetro y la cinta métrica para altura total, la cinta diamétrica para el DAP, y la brújula y cinta métrica para las coordenadas.

Se realizó un muestreo sistemático de raíces finas con una rejilla de amplitud 3x5m, dentro de un área de 20 x 20m en cada una de las parcelas. Se contó el número de matas de pasto en 15 m². En cada intersección de la rejilla (24 puntos), se tomó muestras de raíces a

¹ Diámetro a la altura del pecho (1.3 m sobre el suelo).

cuatro profundidades: 0-10, 10-20, 20-30 y 30-50cm. La colocación del área de muestreo en el campo siguió los siguientes criterios: uno, debería estar por lo menos a cinco metros de las cercas vivas, debería de contener al menos diez arboles de la clase diamétrica representativa y se procuró centrar la rejilla lo mejor posible para tener arboles alrededor. Cuatro meses después de este (Julio, 1998) se realizó otro muestreo de raíces finas debajo de los macollos de cuatro plantas por parcela tomadas al azar.

Para obtener las muestras se utilizó un barreno de acero, que consiste de un cilindro de 8 cm de diámetro por 25 cm de largo, dentado en la base y con un émbolo en su interior que sirve para obtener muestras de suelo- raíces no perturbadas. El cilindro esta sujeto a un mango de un metro de largo, dentro del cual se encuentra una varilla y un engrane (piñón) que con ayuda de una manivela permiten mover el émbolo para extraer la muestra entera sin destruirla. La cabeza del mango esta reforzada y tiene un agujero para colocar una varilla que permite jalar el barreno ya clavado en el suelo. Para introducir el barreno en el suelo se usó un mazo de plástico que absorbe los golpes.

Las muestras se guardaron en el laboratorio a 5°C mientras eran procesadas. Al día siguiente, de cada una de las muestras se tomó una submuestra de suelo de 20g, para la determinación del carbono orgánico por el método de Walkley-Black. A la bolsa con el resto de la muestra se le agregó agua durante un día para deflocular el suelo. Se agitó la bolsa antes de comenzar el lavado. Se lavaron las raíces con agua corriente, sobre un tamiz con malla de 1mm de ancho. Cada muestra de raíces lavadas se guardó en un recipiente de plástico, se conservó en agua con alcohol al 15%, y se mantuvo en refrigeración mientras hasta ser procesadas. Después se limpiaron las muestras, extrayendo hojarasca, insectos, piedras, etc que aún quedaba en la muestra. Las raíces con diámetros mayores a 5mm fueron desechadas. Se separaron entre las del pasto y las del árbol, posteriormente se secaron en un horno a 65°C durante 72 horas.

4.2.3 Análisis de Datos

La biomasa de las raíces se reporta en promedios con sus intervalos de confianza en gramos de materia seca por 50 cm² que corresponde al área muestreada por punto. Se

estimó la biomasa acumulada en raíces finas encontradas en una pastura sola y pasturas asociadas con laurel hasta una profundidad total de 50 cm y por capas (0-10, 10-20, 20-30 y 30-50 cm). Siendo este un estudio de caso sin repeticiones, la interpretación de los resultados se limita a una comparación de las diferentes parcelas.

Se probaron modelos de regresión para estimar un efecto de la distancia a los tres arboles más cercanos y sus medidas respectivas (DAP, altura total) sobre la biomasa de raíces finas. La correlación se usó para determinar una relación entre biomasa de raíces finas y carbono secuestrado en el suelo. Se asume que el C en la biomasa corresponde a la mitad del peso seco (Brown, 1997). Los resultados sobre el carbono en el suelo fueron presentados y discutidos en el Capítulo 3 de esta tesis.

4.3 RESULTADOS

El aporte de la biomasa de raíces finas al “pool” de carbono del suelo fué insignificante (<1%, considerando que el carbono en las raíces es la mitad del peso seco) comparado con el aporte del suelo (Figura 1). Al igual que en el carbono del suelo, no se

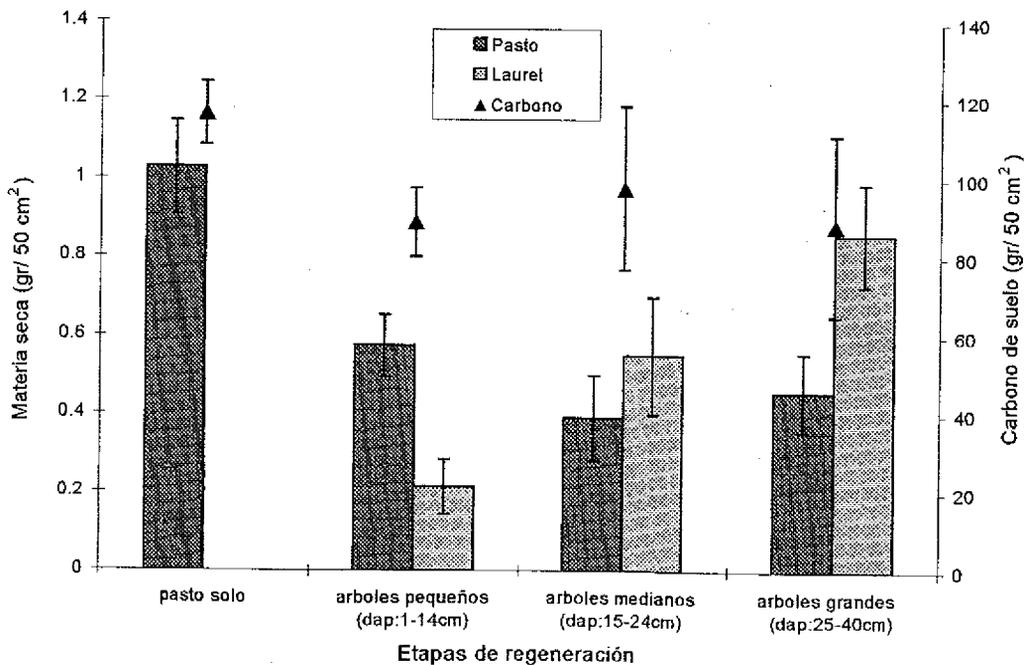


Figura 1. Carbono del suelo y biomasa de raíces finas (materia seca) del pasto (*Panicum maximum*) solo y con laurel (*Cordia alliodora*) en regeneración natural en La Fortuna de San Carlos, Costa Rica. Promedios con intervalos de confianza.

apreció mucha diferencia en el contenido de raíces finas del pasto entre las parcelas con arboles. En promedio las parcelas arboladas representaron la mitad de la biomasa de raíces de pasto encontrada en la parcela con pasto solo. La biomasa de raíces de laurel aumentó conforme a la edad de los árboles. Mientras que en la parcela con árboles pequeños dominaron las raíces del pasto, en la parcela con árboles grandes, fueron las del laurel.

El aumento de raíces finas de laurel estuvo presente en todas las capas conforme aumentó la edad del rodal. La cantidad de raíces finas disminuyó con la profundidad. En todas las parcelas se mantuvo aproximadamente la misma cantidad de biomasa de raíces de pasto por capas (Figura 2). Aproximadamente la mitad de las raíces finas se localizaron en los primeros 10 cm de profundidad en las cuatro parcelas.

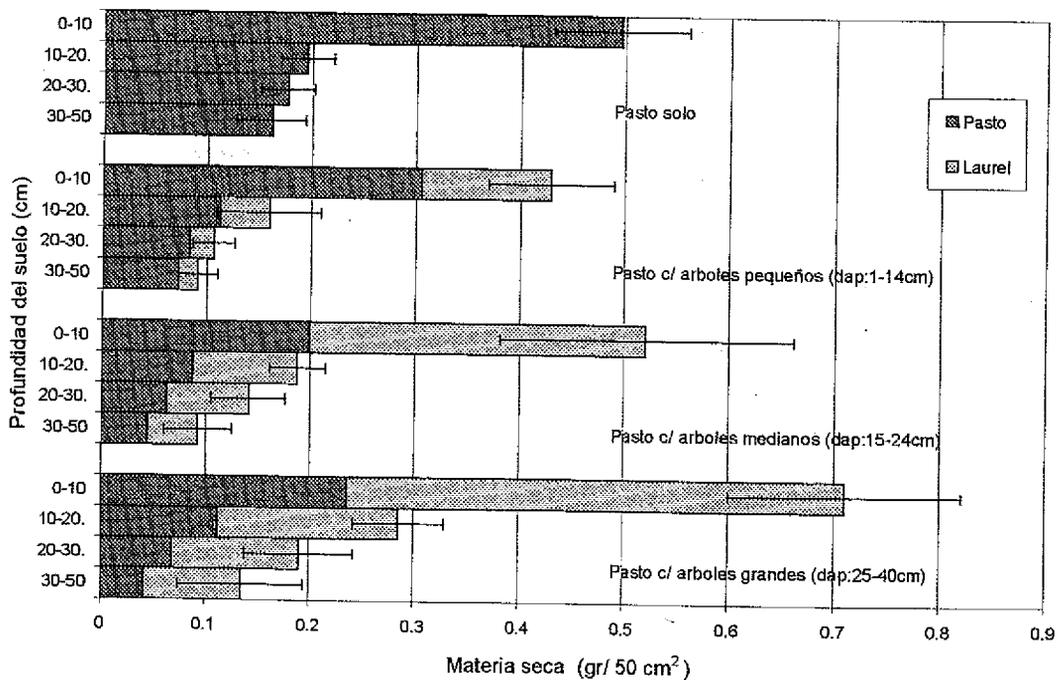


Figura 2. Biomasa de raíces finas (materia seca) del pasto (*Panicum maximum*) solo, y con laurel (*Cordia alliodora*) en diferentes capas de suelo en La Fortuna de San Carlos, Costa Rica. Promedios con intervalo de confianza para promedios totales.

El análisis de regresión reveló que no hubo relación entre la distancia a los arboles más cercanos y la biomasa de raíces finas. Tampoco se encontró relaciones con otras variables como el DAP y la altura total de los arboles. La cantidad de carbono del suelo no tuvo correlación con la biomasa de raíces finas total, ni con la del pasto solo, ni con la del

laurel. Un muestreo de raíces realizado justo debajo de los macollos, cuatro meses después del primero (época lluviosa) mostró que la biomasa de raíces debajo del macollo era más de cuatro veces la biomasa de raíces muestreada junto al macollo (Figura 3).

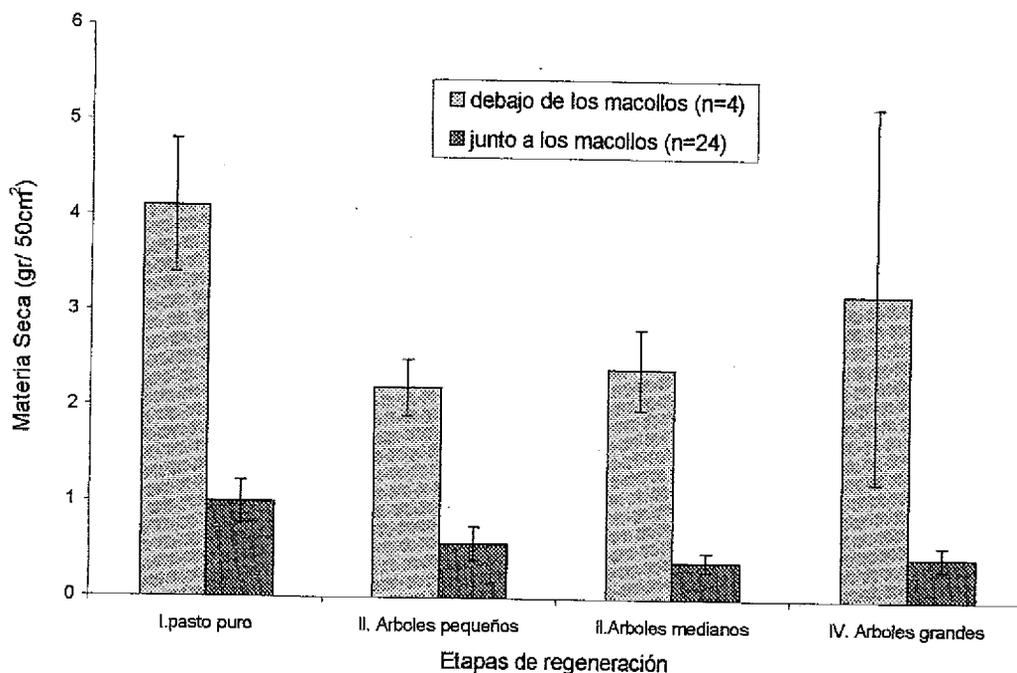


Figura 3. Biomasa de raíces finas (materia seca) del pasto (*Panicum maximum*) debajo y junto a los macollos, asociado con *Cordia alliodora* en regeneración natural en La Fortuna de San Carlos, Costa Rica. Promedios con intervalo de confianza.

4.4 DISCUSIÓN

El aumento significativo de la biomasa de raíces finas del laurel en todas las capas se debe a su rápido crecimiento y eficiente sistema radicular, que le permite explotar nutrientes en mayor volumen de suelo (Haggar y Ewel, 1994), crecer exitosamente para así acumular carbono en toda la planta. Debido a la compactación en dos capas inferiores (Anexo 1), las parcelas arboladas mostraron una reducción en la biomasa de raíces del árbol, lo que no fué evidente en la parcela con pasto puro, donde exceptuando la primera capa, todas tuvieron casi la misma cantidad de biomasa de raíces. El laurel es una especie que demanda grandes cantidades de nutrientes. La compactación del suelo por el sobrepastoreo, afecta negativamente el desarrollo de las raíces y por lo tanto la absorción de nutrientes (Bergmann *et al.*, 1994).

En la parcela con arboles grandes, las raíces de laurel superaron a las del pasto en todas las capas. Además llegó a superar a la biomasa de raíces de pasto de la parcela sin arboles, que crecieron en un suelo más fértil (Anexo 1). En monocultivo, el laurel puede llegar a desarrollar relativamente altas densidades de raíces finas (Berish y Ewel, 1988), por lo que los efectos competitivos de este árbol, de copa abierta, se encuentran casi en su totalidad bajo el suelo (Gerwing, 1995). En un bosque semideciduo menor de 12 años se encontró menor cantidad de raíces finas que en rodales de 30 años (Deans *et al.*, 1996). La acumulación de raíces finas en la primera capa concuerda con los datos que Jackson *et al.* (1996) calcularon: los pastos tuvieron el 44% de sus raíces finas en los primeros 10 cm del suelo.

Aunque la distribución de las raíces finas del pasto en las cuatro parcelas, fué muy parecida a la del carbono orgánico, no se encontró correlación entre sus valores. Esto es probablemente debido a la alta variabilidad en las muestras de raíces y a la influencia de los arboles. La similitud mencionada puede estar relacionada con el hecho que las raíces finas del pasto se descomponen más rápidamente que las del árbol, incorporando constantemente carbono al suelo (Bloomfield *et al.*, 1996). Las raíces finas de los arboles son más lignificadas y almacenan carbono más tiempo. Para poder estimar su contribución al secuestro de carbono en el suelo, se requieren estudios más detallados sobre su tasa de producción y descomposición.

4.5 CONCLUSIONES

La importancia de las raíces finas al secuestro de carbono en el suelo está en función de su tasa de producción y descomposición. Los datos del estudio nos ofrecen un resultado preliminar sobre la distribución de la biomasa de raíces finas y su posible relación con la distribución de carbono en el suelo.

En suelos fértiles con buen drenaje y buena estructura, se puede recomendar la regeneración natural de laurel en pasto guinea, ya que es capaz de desarrollarse bien gracias a sus abundantes raíces finas. El pasto guinea puede mantener un nivel de biomasa

que garantiza su producción adecuada. Las raíces finas de los árboles de laurel parecen ser competitivos con las raíces de este tipo de pasto.

Por el trabajo e inversión que requieren, hay pocos estudios que incluyen información sobre raíces. Lo ideal sería proporcionar datos no solo de biomasa de raíces finas, sino también de raíces gruesas, la proporción de raíces vivas y muertas, y su distribución en sistemas mixtos.

Para el muestreo de raíces finas en sistemas silvopastoriles con pastos amacollados, se recomienda tomar en cuenta el área que ocupan los macollos y la biomasa de raíces debajo de ellos, con el fin de obtener una evaluación de raíces finas del sistema más completa. Como se pudo demostrar en este estudio, la diferencia entre raíces de pasto junto y debajo del macollo puede ser enorme, aún considerando que las muestras no fueron tomadas en la misma época.

4.6 BIBLIOGRAFÍA

- Bazzaz, F.A. Plants in changing environments. Linking physiological, population and community ecology. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. 320 p.
- Bergmann, C.; Stuhmann, M; Zech, W. 1994. Site factors, foliar nutrient levels and growth of *Cordia alliodora* plantations in the humid lowlands of northern Costa Rica. Plant and Soil 166: 193-202
- Berish, C.W.; Ewel, J.J. 1988. Root development in a simple and complex successional ecosystems. Plant and Soil 106: 73-84.
- Bloomfield, J.; Vogt, K.; Wargo, P.M. 1996. Tree root turnover and senescence. In: Waisel, A.E.Y., Kafkafi, U. (eds) Plant Roots: The hidden half. Marcel Dekker, New York, p 363-381.
- Boshier; D.H; Lamb, A.T. 1997. *Cordia alliodora*: Genética y Mejoramiento de árboles. Tropical Forestry Papers 36, Oxford Forestry Institute. 100 p
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forest. A primer. FAO Forestry Papers No. 134. Rome. 55 p.

- Brown, S. y Lugo, A.E. 1990. Tropical secondary forests. *Journal of Tropical Ecology*, 6: 1-32.
- Castillo Muñoz, R. 1984. Geología de Costa Rica. Una sinopsis. Universidad de Costa Rica, San José. p. 55-59.
- CONIF, 1988. *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken. Experiencias en Colombia. Compilado por Paulvan der Poel. Serie de documentación No. 15. Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal. Convenio CONIF- Holanda. Bogotá, Colombia. 38p.
- Deans, J.D.; Moran, J.; Grace, J. 1996. Biomass relationships for tree species in regenerating semideciduous tropical moist forest in Cameroon. *Forest Ecology and Management* 88:215-225.
- FAO, 1993. Forest resources assesment 1990-tropical countries. Forestry paper # 112. FAO, Rome.
- Gerwing, J.J. 1995. Competitive effects of three tropical tree species on two species of *Piper*. *Biotropica* 27 (1):47-56.
- Greaves, A.; McCarter. 1990. *Cordia alliodora*: a promising tree for tropical agroforestry. Oxford Forestry Institute. Tropical Forestry Papers 22, 37 p.
- Haggar, J.P.; Ewel, J.J.; 1994. Experiments on the ecological basis of sustainability: early findings on nitrogen, phosphorus and root systems. *Interciencia*, 19 (6): 347-351.
- Harvey, C.A.; Haber, W.A.; Mejias, F.; Solano, R. 1998. Remnant trees in Costa Rican pastures. Tools for conservation? *Agroforestry Today*, July-September. p.7-9
- Herrera, W. 1986. El clima de Costa Rica. vol. 2. Universidad Estatal a Distancia. San José. Costa Rica. 118 p.
- Holdridge, L.R. 1996. Ecología basada en zonas de vida. IICA, San José, Costa Rica. 216p
- Jackson, R.B.; Canadell, J.; Ehlenringer, J.R.; Mooney, H.A.; Sala, O.E.; Schulze, E.D. 1996. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* 108: 389-411.
- Kennard, D.G.; Walker, B.H. 1973, Relationships between canopy cover and *Panicum maximum* in the vicinity of Fort Victoria. *Rhodesian Journal of Agricultural Research* 11: 145-153.
- Siegenthaler, U; Sarmiento, J.L. 1993. Atmospheric carbon dioxide and the ocean. *Nature* 365: 119-121

Tschinkel, H.M.1965. Algunos factores que influyen en la regeneración natural de *Cordia alliodora* (Ruiz y Pav) Cham. Turrialba 15 (4): 317-324.

USDA, 1996. Keys to Soil Taxonomy. 7th ed. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 644 p.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.

1. Donde la agroforestería es rentable, el costo de capturar y conservar el carbono es nulo. Por eso en este contexto la agroforestería deberá ofrecer una amplia gama de prácticas para aprovechar la gran superficie disponible. ej. Silvopastoreo con regeneración natural.
2. Los sistemas agroforestales pueden ser manejados de tal manera, que ayuden a estabilizar las emisiones de gases de invernadero secuestrando de CO₂ en las plantas y almacenando a largo plazo C y N en el componente leñoso y en el suelo, y reduciendo la deforestación.
3. La conversión de bosques y praderas a tierras agrícolas resulta en una pérdida de C del suelo. Contrario a la agricultura intensiva, el establecimiento de sistemas agroforestales con perennes ó la labranza de conservación, pueden aumentar las existencias de C.
4. La presencia de arboles grandes en las pasturas ayuda a acumular C en capas inferiores del suelo y en sus inmediaciones. Se recomiendan prácticas como el raleo, para mantener uniformidad espacial en la regeneración de arboles en potreros y mayor productividad de la pastura asociada.
5. La madera producida puede generar ingresos que motiven al productor a mejorar el manejo de los rodales de regeneración natural. *C. alliodora* en pastos de *P. maximum*, tiene el potencial de secuestrar carbono en la madera sin afectar el carbono almacenado en el suelo. Así, esta madera utilizada para muebles ó construcción puede conservar aún el carbono por mucho más años.
6. Las raíces finas de los arboles de laurel se descomponen más lentamente en comparación con las raíces del pasto, por lo que su contribución al secuestro de carbono en el suelo es bajo. En este estudio las raíces finas de ambas especies almacenaron menos del 1% de la cantidad encontrada en el suelo.

7. Por el trabajo y la inversión que requieren, hay pocos estudios que incluyen información sobre raíces. Lo ideal sería proporcionar datos no solo de biomasa de raíces finas, sino también de raíces gruesas, la proporción de raíces vivas y muertas y la distribución de raíces en sistemas mixtos.

8. Se requiere estudios más detallados que incluyan además diferentes suelos, especies de pastos y ecozonas para poder dar recomendaciones más confiables sobre el secuestro de carbono en sistemas silvopastoriles con *C. alliodora* en regeneración natural.

ANEXOS

A1. RESULTADOS DE LOS ANALISIS QUIMICOS Y FISICOS DE LOS SUELOS EXPERIMENTALES

Tabla1. Características químicas de los suelos experimentales.

Profundidad ad (cm)	pH (agua)	Acidez Ext. -----cmol(+)/l-----	Ca	Mg	K	P Mg/l	P Reten.	Fe -----%	Al -----%	N total
<i>pasto con arboles</i>										
0-10	6.1	0.07	8.06	1.56	0.22	3.05	73.5	0.72	1.47	0.72
10-20	6.0	0.13	2.36	0.40	0.06	1.39	82.5	0.81	1.70	0.65
20-40	6.3	0.09	0.78	0.10	0.04	1.52	45.2	0.73	0.84	0.03
40-70	6.4	0.09	0.85	0.10	0.03	1.66	52.5	0.76	1.00	0.07
70-100	6.4	0.11	2.16	0.15	0.02	0.55	94.9	1.08	3.32	0.36
<i>pasto solo</i>										
0-10	6.1	0.17	4.54	1.10	0.17	2.56	84.65	1.32	2.60	1.02
10-20	6.2	0.13	2.91	0.38	0.07	1.21	92.72	1.47	3.36	0.75
20-40	6.5	0.10	2.51	0.21	0.03	1.08	92.77	1.36	2.95	0.53
40-60	6.6	0.10	1.98	0.19	0.02	1.75	88.32	1.59	3.13	0.34
60-100	6.7	0.10	1.90	0.15	0.03	2.15	53.61	1.09	1.47	0.26

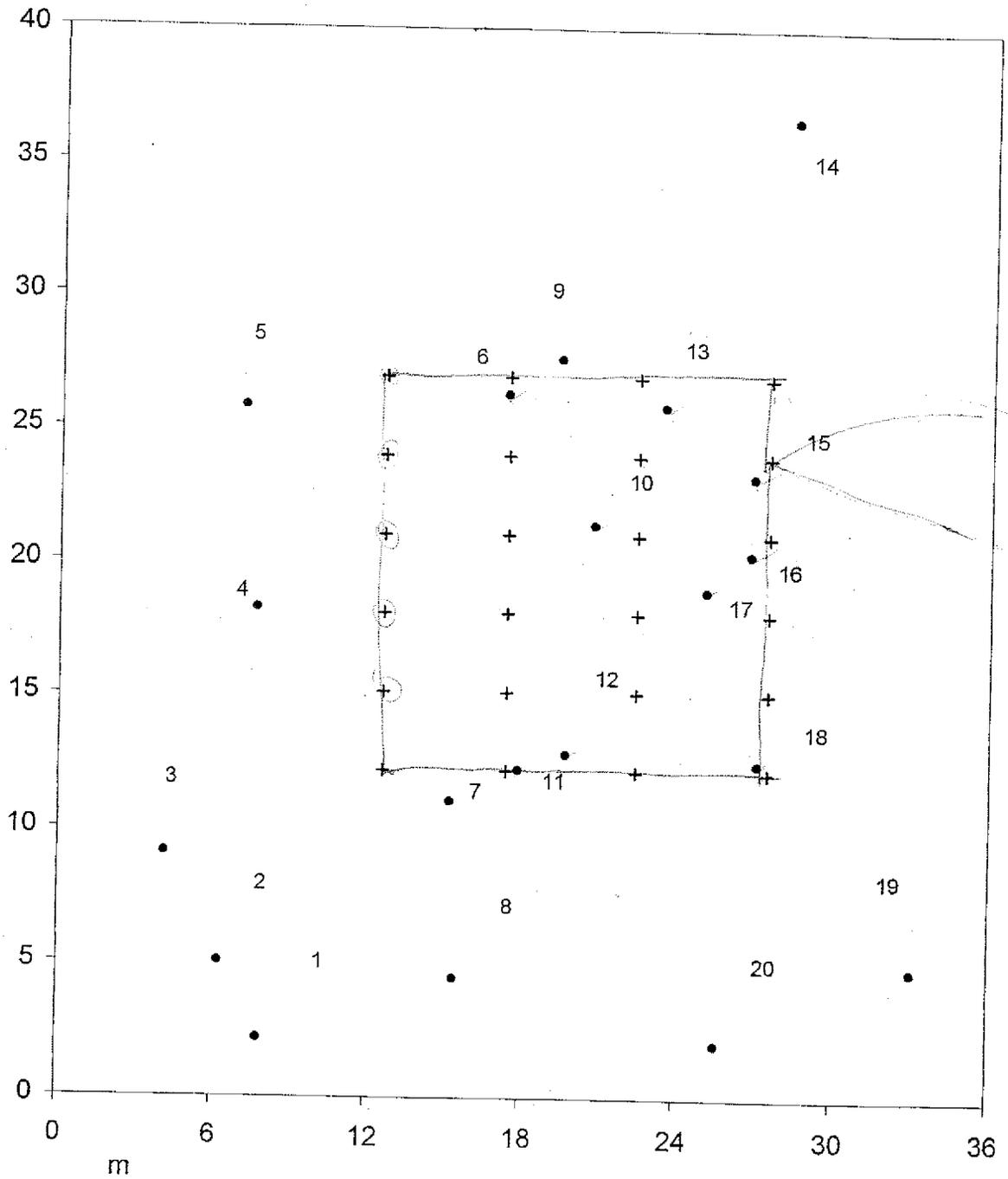
Tabla 2. Características físicas de los suelos experimentales

Profundidad (cm)	Den. Apar. g/c ³	Textura	arena -----%	limo	arcilla
<i>pasto con arboles</i>					
0-10	0.96	Franco-arenosa	68	22	10
10-20	0.95	Franco-arenosa	70	24	6
20-40	1.23	Arena	90	6	4
40-70	1.39	Arena-francosa	84	12	4
70-100	0.88	Arena-francosa	76	20	4
<i>pasto solo</i>					
0-10	0.75	Franco-arenosa	74	19	7
10-20	0.71	Arena-francosa	77	17	6
20-40	0.81	Arena-francosa	74	22	4
40-60	1	Arena-francosa	76	20	4
60-100	* n.t.	Arena-francosa	81	15	4

* la muestra no fue tomada

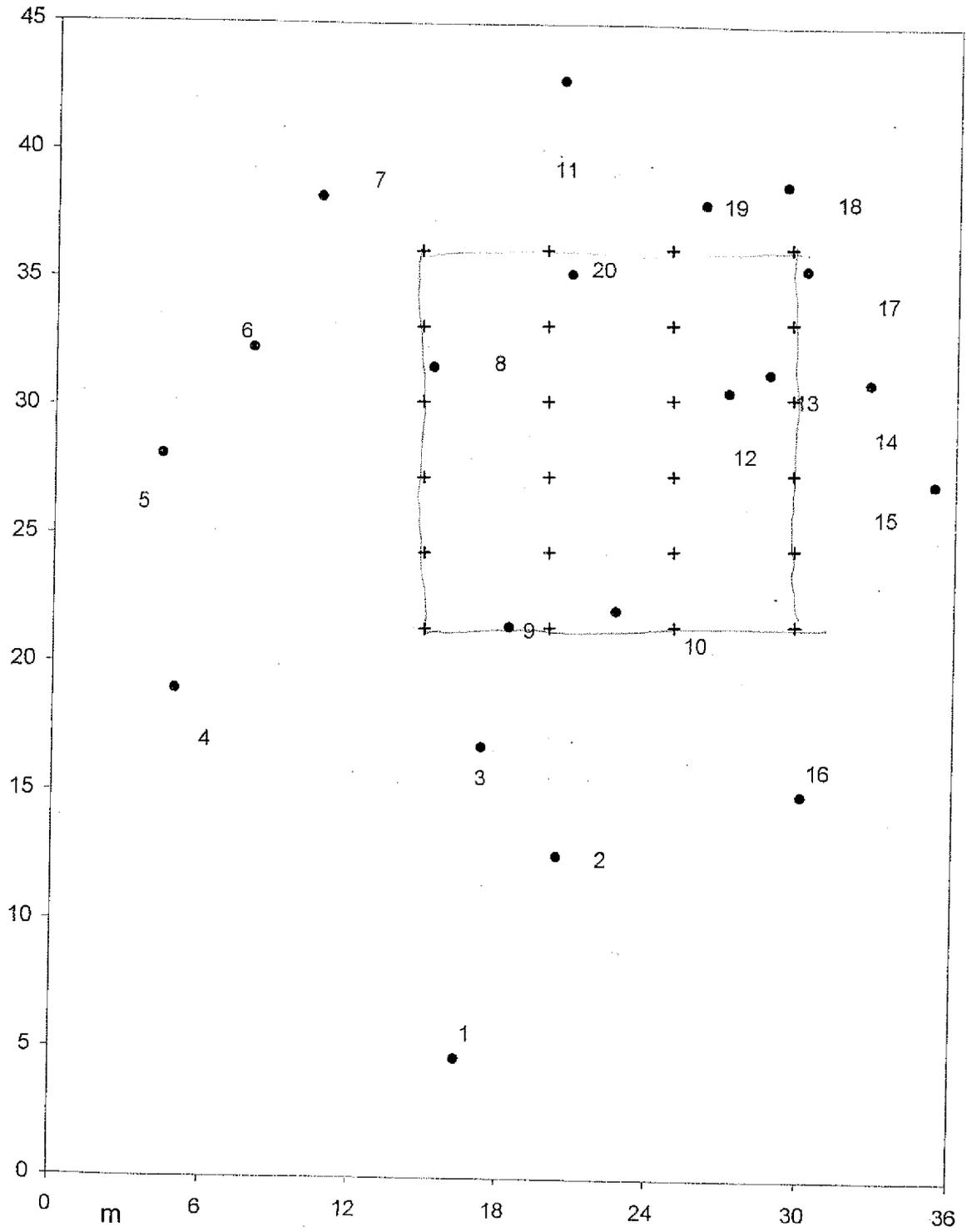
A 2. Distribución de arboles y puntos de muestreo de suelo en las parcelas experimentales.

a) Parcela con arboles pequeños (dap \approx 1-14 cm)



- arboles de laurel
- + puntos de muestreo

b) Parcela con arboles medianos (dap= 15-24 cm)



● arboles de laurel
+ puntos de muestreo

c) Parcela con arboles grandes (dap: 25-40 cm)

