

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACION

ESCUELA DE POSTGRADO

**ARQUITECTURA Y DISTRIBUCION ESPACIAL DE RAICES
DE *Eucalyptus deglupta* DENTRO DE UN SISTEMA AGROFORESTAL
SIMULTANEO CON *Coffea arabica***

POR

EDDY ALBERTO MORALES RIOS



**Turrialba, Costa Rica
1997**

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
CATIE

Edificio Comemorativo
CRION - IICA - CATIE

12 DIC 1997

RECIBIDO

Turrialba, Costa Rica

AREA DE POSGRADO

TESIS DE GRADO

“ARQUITECTURA Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE RAÍCES DE *Eucalyptus deglupta*
DENTRO DE UN SISTEMA AGROFORESTAL SIMULTÁNEO CON *Coffea arabica*.”

PRESENTADA POR:

EDDY ALBERTO MORALES RIOS

COMITE ASESOR:

JOHN BEER, PROFESOR CONSEJERO
JORGE FAUSTINO, MIEMBRO DEL COMITE
FRANCISCO JIMENEZ, MIEMBRO DEL COMITE
GOETZ SCHROTH, MIEMBRO DEL COMITE

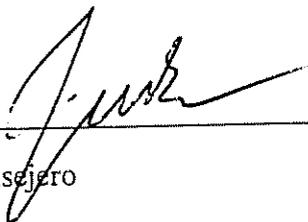
TURRIALBA, COSTA RICA
DICIEMBRE, 1997

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por la Jefatura del Area 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:

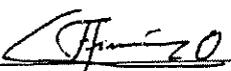
CATIE

MAGISTER SCIENTIAE

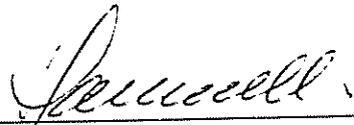
FIRMANTES:



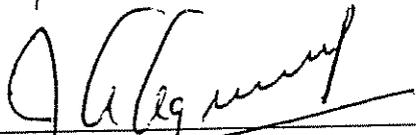
John Beer
Profesor Consejero



Francisco Jiménez
Miembro Comité Asesor



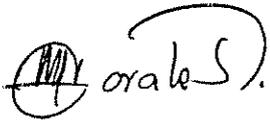
Jorge Faustino
Miembro Comité Asesor



Juan A. Aguirre
Jefe. Area de Postgrado



Markku Kanninen
Director, Programa de Enseñanza



Eddy Alberto Morales Ríos
Candidato

RESUMEN

Se estudió la distribución espacial de raíces finas del eucalipto y del café en cafetales del Valle Central de Costa Rica. Las parcelas formaron una "pseud" serie de tiempo con respecto a la edad del eucalipto, con árboles de 1, 4, 5, 6 y 7 años. El esquema de muestreo consistió en un cuadro de 1.90 x 1.90 m en el que uno de los vértices fue el eje del árbol; en cada cuadro se distribuyeron horizontalmente 15 puntos de muestreo a 5 profundidades (0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y 40-60 cm). La estimación de la densidad de longitud de raíces se realizó con el auxilio de un "scanner" y el empleo de software comercial y aplicaciones diseñadas para este trabajo. No se encontró evidencia de competencia interespecífica en este estudio, pero los estratos superficial (0-10 cm) y subsuperficial (10-20 cm) presentan correlaciones negativas significativas de escasa magnitud. La especie con mayor cantidad de raíces finas podría competir con éxito en caso de presentarse algún déficit de agua o nutrientes. En general, las raíces finas del café aproximadamente duplican en cantidad a las del eucalipto indicando una mayor exploración del suelo por parte del café pero esto no significa necesariamente una mayor capacidad competitiva. Las raíces finas del eucalipto son más delgadas, exploran el suelo con baja inversión en carbono. La diferenciación espacial de las raíces finas de ambas especies es escasa, aunque se observa la presencia de conglomerados y la tendencia de las raíces finas de ambas especies a crecer más en las bandas de abonamiento del café que en las calles, no obstante, la evidencia es débil. Se encontró evidencia para suponer un desplazamiento del "centro de absorción" del eucalipto, el cual ocurre en forma de conglomerados alejándose del eje del árbol asociados a la ubicación de raíces leñosas laterales. Por último, se caracterizó y describió la arquitectura de la raíz del eucalipto, con base en muestras de raíces leñosas de árboles de 7 años. Un análisis topológico, cuya metodología fue en gran parte desarrollada para este trabajo, mostró su potencialidad para la modelación de raíces leñosas laterales.

Palabras claves: *Eucalyptus deglupta*, *Coffea arabica*, distribución de raíces finas, competencia subterránea, raíces leñosas, arquitectura de sistemas radiculares, sistemas agroforestales simultáneos.

ABSTRACT

Fine root spatial distribution on a simultaneous agroforestry system coffee/eucalyptus was studied. A "pseudo" time series with respect to 1, 4, 5, 6, 7 aged eucalyptus trees was considered. Sampling plot has a 1.90 side, the tree axis was located at one of the plot vertices. Within one plot were placed 15 sampling points, each with 5 depths (0-10, 10-20, 20-30, 30-40 and 40-60 cm). For root length density estimations was used a scanner and commercial and own-made software. Any evidence about interspecific competition not was founded in this work, but negative correlations at 0-10 and 10-20 depths show that the species with greater root length density should to compete well if a water or nutrient stress condition meets. Coffee fine roots approximately double the quantity of eucalyptus fine roots, showing greater soil exploration but not necessarily a greater competition capacity. Fine roots of eucalyptus are thinner, their advantage lies in explore and exploit soil with low carbon investment. Spatial differentiation is poor. Cluster formation of fine roots of both species and a trend to growth in the fertilizer band has seen with a small evidence. Better evidence was found about a displacement of the "root absorption center" of eucalyptus, that is, fine root clusters moving out of the tree axis. The apparently random location of these cluster is associated with the growth of coarse roots. Finally, an architectural description of coarse roots of eucalyptus is presented and a topological analysis shows its potential for modelling lateral coarse roots.

Key words: *Eucalyptus deglupta*, *Coffea arabica*, fine root distribution, belowground competition, coarse roots, root systems architecture, simultaneous agroforestry systems.

AGRADECIMIENTOS

Al colectivo del CATIE, por su destacada labor en pro del desarrollo agropecuario sostenible en nuestros países.

Al Dr. John Beer por su permanente apoyo para sacar adelante mi trabajo de tesis y permitirme aspirar a otros proyectos mayores.

A mis profesores del Area de Cuencas, Dr. Hernán Solís, Dr. Jorge Faustino, Dr. Francisco Jimenez e Ing. Sergio Velasquez, no solo por los muchos conocimientos impartidos y compartidos, sino también por la amistad desinteresada que me brindaron.

Al Ing. Juan José Fernandez, dueño de la finca "El Rosario", por su espíritu desinteresado de cooperación, interés científico y amistad sincera, haciendo posible la obtención de datos.

Al Ing. German Aguilar, Ing. Eliezer Campos e Ing. Ronny Alfaro del ICAFE, por sus valiosos y múltiples aportes al presente trabajo.

A Paulo, Francisco y Joaquin por soportar conmigo las árdas labores de campo.

A Andrea y Estrella por permitirme sacrificar el tiempo que les correspondía.

DEDICATORIA

A las mujeres de mi vida...

CONTENIDO

1. INTRODUCCION	1
2. REVISION DE LITERATURA	5
2.1 ¿POR QUE ESTUDIAR SISTEMAS RADICALES? APUNTES SOBRE LA INVESTIGACION DE RAICES DENTRO DE SISTEMAS AGROFORESTALES	5
2.2 ANATOMIA, MORFOLOGIA Y ARQUITECTURA DE SISTEMAS RADICALES DE <i>Eucalyptus</i> spp. Y <i>Coffea</i> spp.	7
2.2.1 DESCRIPCION ANATOMICA DE LAS RAICES DE LAS DICOTILEDONEAS EN EL EJEMPLO DE <i>Eucalyptus</i> spp. y <i>Coffea</i> spp... ..	8
2.2.2 ESTRUCTURA Y ARQUITECTURA DE LA RAIZ DE <i>Eucalyptus</i> spp... ..	8
2.2.3 ESTRUCTURA Y ARQUITECTURA DE LA RAIZ DE <i>Coffea</i> spp.	10
2.3 ARQUITECTURA DE RAICES	11
2.4 GENERALIZACIONES EN EL ESTUDIO DE SISTEMAS RADICALES: EVOLUCION METODOLOGICA Y MODELACION MATEMATICA	14
2.4.1 METODOS DE ESTUDIO DE RAICES	15
2.4.2 MODELACION DE SISTEMAS RADICALES	19
3. METODOLOGIA	22
3.1 DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO	22
3.2 MANEJO AGRONOMICO DE LAS PARCELAS	23
3.3 ESQUEMA DE MUESTREO	28
3.3.1 ESQUEMA DE MUESTREO PARA RAICES FINAS	28
3.3.2 ESQUEMA DE MUESTREO PARA RAICES LEÑOSAS	32
3.4 MEDICIONES Y ANALISIS	32
3.4.1 RAICES FINAS	32

3.4.2. RAICES LEÑOSAS	38
3.4.2.1 ANALISIS TOPOLOGICO	39
4. RESULTADOS Y DISCUSION	42
4.1 DISTRIBUCION ESPACIAL DE RAICES FINAS DE EUCALIPTO	42
4.2 ARQUITECTURA DE RAICES DE EUCALIPTO	56
5. CONCLUSIONES	67
6. BIBLIOGRAFIA	70
ANEXO A. DESCRIPCION DE PERFILES DE SUELO DE DOS PARCELAS DE LA FINCA "ROSARIO"	78
ANEXO B. INVENTARIO DE SAF's <i>Coffea arabica</i> + <i>Eucalyptus</i> <i>deglupta</i> EN LAS PARCELAS ESTUDIADAS	79
ANEXO C. LISTADO DE PROGRAMA BASIC PARA CALCULAR DENSIDAD DE RAICES EN LONGITUD	85
ANEXO D. MAPAS CON CURVAS DE CONTORNO DE DENSIDAD DE RAICES EN LONGITUD (DRL cm/cm ³ suelo)	92
ANEXO E. ANALISIS DE FRACTALES PARA MUESTRAS DE RAICES LEÑOSAS	118

INDICE DE CUADROS

CUADRO 3.1 INFORMACION GENERAL SOBRE EL MANEJO DE LAS PLANTACIONES	24
CUADRO 3.2 PROGRAMA DE FERTILIZACION PARA CAFE EN DESARROLLO (1er. AÑO) UTILIZADO EN LOS SITIOS	25
CUADRO 3.3 PROGRAMA DE FERTILIZACION PARA CAFE EN PRODUCCION VIGENTE EN LOS SITIOS ESTUDIADOS	26
CUADRO 3.4 USO DE ELEMENTOS DE NUTRICION VEGETAL EN LOS SITIOS ESTUDIADOS	27
CUADRO 3.5 CARACTERISTICAS MORFOLOGICAS COMPARATIVAS ENTRE RAICES FINAS DE <i>C. arabica</i> y <i>E. deglupta</i>	34
CUADRO 3.6 RESULTADOS DE VALIDACION DEL PROGRAMA BASIC PARA EL CALCULO DE DENSIDAD DE LONGITUD DE RAICES	37
CUADRO 4.1 COEFICIENTES DE CORRELACION TAU DE KENDALL ENTRE DATOS DE RAICES FINAS DE CAFE Y EUCALIPTO, CONSIDERANDO LA EDAD DEL EUCALIPTO Y DIFERENCIAS DE SITIO EN LAS PARCELAS	45
CUADRO 4.2 DENSIDAD DE LONGITUD DE RAICES DE CAFE Y EUCALIPTO PARA PARCELAS CON DIFERENTES EDADES DE EUCALIPTO Y VARIAS PROFUNDIDADES	49
CUADRO 4.3 COMPARACION DE DENSIDAD DE LONGITUD DE RAICES SEGUN ESPECIES Y PROFUNDIDAD	51
CUADRO 4.4 CARACTERISTICAS ARQUITECTURALES GENERALES DE LA RAIZ DE <i>E. deglupta</i> DE 7 AÑOS DE EDAD	56
CUADRO 4.5 CARACTERISTICAS DE LOS PRINCIPALES TIPOS DE RAIZ DE <i>E. deglupta</i>	58
CUADRO 4.6 ESTADISTICAS DESCRIPTIVAS PARA LAS ESTIMACIONES DE LOS PARAMETROS ALFA Y Q	65

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1 ESQUEMAS DE MUESTREO PARA RAICES FINAS	31
FIGURA 3.2 SITIOS DE EXCAVACION DE MUESTRAS DE RAICES LEÑOSAS PARA ANALISIS DE FRACTALES	33
FIGURA 3.3 LONGITUD APARENTE Y LONGITUD REAL DE UNA RAIZ LEÑOSA	40
FIGURA 4.1 DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS DE DLR DE EUCALIPTO PARA EL ESTRATO DE 0 A 10 cm DE PROFUNDIDAD	42
FIGURA 4.2 GRAFICO Q-Q ENTRE DLR DE EUCALIPTO Y DLR DE CAFE, PARA EL ESTRATO 0-10 DE PROFUNDIDAD	43
FIGURA 4.3 DENSIDAD DE LONGITUD DE RAICES DEL CAFE PARA PARCELAS CON DIFERENTES EDADES DE EUCALIPTO Y VARIAS PROFUNDIDADES	48
FIGURA 4.4 DENSIDAD DE LONGITUD DE RAICES DEL EUCALIPTO PARA PARCELAS CON DIFERENTES EDADES DE EUCALIPTO Y VARIAS PROFUNDIDADES	48
FIGURA 4.5 DISTRIBUCION DE CLASES DIAMETRALES PARA LAS RAICES FINAS DE <i>Coffea arabica</i>	54
FIGURA 4.6 DISTRIBUCION DE CLASES DIAMETRALES PARA LAS RAICES FINAS DE <i>Eucalyptus deglupta</i>	54
FIGURA 4.7 ESQUEMA DE CRECIMIENTO DE LAS RAICES LATERALES DEL EUCALIPTO	59
FIGURA 4.8 DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS PARA DATOS DE LONGITUD APARENTE	60
FIGURA 4.9 DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS PARA DATOS DE LONGITUD REAL	61
FIGURA 4.10 MEDIAS DE LONGITUDES APARENTES Y REALES DE SEGMENTOS DE RAIZ DE EUCALIPTO SEGUN ORDENES DE RAMIFICACION .	62
FIGURA 4.11 DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS PARA EL PARAMETRO DE PROPORCIONALIDAD ALFA	63
FIGURA 4.12 DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS PARA EL PARAMETRO DE ASIGNACION Q	64

FIGURA 4.13 DIAGRAMA DE DISPERSION DE LOS DATOS DEL PARAMETRO
ALFA CON RESPECTO AL DIAMETRO ANTERIOR AL EVENTO DE
RAMIFICACION 65

FIGURA 4.14 DIAGRAMA DE DISPERSION DE LOS DATOS DEL PARAMETRO
Q CON RESPECTO AL DIAMETRO ANTERIOR AL EVENTO DE
RAMIFICACION 66

1. INTRODUCCION

La producción de café es una actividad muy importante en el desarrollo económico de Costa Rica. Con una extensión de 101 mil hectáreas en cuatro zonas de producción, la caficultura ocupa el 2.3% de la superficie dedicada a la producción agropecuaria y el 41.2% de la superficie dedicada a cultivos permanentes en el país (FAO, 1995).

El cultivo de café se realiza generalmente dentro de sistemas agroforestales simultáneos con árboles de sombra. Aunque los rendimientos de café son elevados en plantaciones sin sombra con uso intensivo de insumos; en las zonas de Acosta y Puriscal un 95% de los finqueros asocian al café al menos una especie arbórea para sombra (Lagemann y Heuveldop, 1982). Las fincas pequeñas (en promedio de 7 hectáreas) en general combinan árboles fijadores de nitrógeno (p. e. *Inga* spp., *Erythrina* spp.) con frutales (p. e. *Citrus* spp., *Musa* spp., *Mangifera indica*, *Persea americana*) y/o especies maderables. Por su parte, las fincas más grandes (en promedio de 13 hectáreas) distribuyen una sola especie arbórea de valor comercial (p. e. *Cordia alliodora*, *Grevillea robusta*, *Cedrela odorata*, *Eucalyptus* spp.) dentro de plantaciones mejoradas de café. Este hecho deja entrever la existencia de estrategias de diversificación de cultivos, principalmente debido a motivos económicos y de abastecimiento local de alimentos.

La elevada variabilidad y frecuentes caídas de los precios del café en los mercados locales e internacionales ha dado lugar al fortalecimiento de las estrategias de diversificación de los sistemas de cultivo del café. Una de estas estrategias consiste en sustituir paulatinamente los árboles leguminosos usados tradicionalmente que tienen poco o ningún valor comercial, por especies maderables de crecimiento rápido. El supuesto básico es que con este cambio se lograrían ganancias mayores gracias a la especie maderable y/o se reduciría el riesgo económico bajo condiciones de precios fluctuantes del café.

No obstante, el uso de ciertas especies, probablemente muy competitivas, como *Eucalyptus* spp. puede ocasionar un descenso pronunciado del rendimiento de las plantas de café ubicadas en la vecindad de los árboles debido a competencia por luz en la parte aérea y por agua y nutrientes a nivel de sistemas radicales. Por ejemplo, las densidades de *Eucalyptus deglupta* y *E. grandis* en ciertas plantaciones de café en la zona de Turrialba fluctúan entre 400 a 1600 árboles por hectárea (Sánchez, 1994) lo cual permite suponer la existencia de fuertes efectos de competencia.

Si bien los efectos del asocio de algunos árboles leguminosos (p.e. *Erithryna*) con café han sido estudiados con bastante detalle en la región, el efecto de *Eucalyptus* spp. en la productividad de los cafetales, sus impactos en los agroecosistemas cafetaleros y la sostenibilidad ambiental de este tipo de asocio aún no se han evaluado, a pesar de que esta especie ya ha sido plantada en un número significativo de fincas en las zonas cafetaleras de Costa Rica. Las especies más utilizadas son *E. deglupta*, *E. saligna* y *E. grandis*. (Montagnini *et al.*, 1992; Sánchez, 1994).

Es necesario contar con información cuantitativa sobre los efectos positivos y negativos de la distribución espacial, crecimiento y posibles efectos de competencia interespecífica de raíces dentro de sistemas agroforestales para su optimización. Con respecto a las relaciones radicales del sistema agroforestal simultáneo *Eucalyptus* spp. + *Coffea arabica* se requiere mayor información para diseñar sistemas agroforestales mejorados u optimizar el manejo de los sistemas ya existentes en el país. Algunas de las posibles prioridades de investigación de raíces serían: (a) cómo y cuánto contribuyen las raíces de eucalipto a cerrar los ciclos de nutrientes; (b) cuánto C fijan en el suelo las raíces del sistema eucalipto-café frente a otros sistemas alternativos y diferentes árboles de sombra; (c) en qué medida la presencia de eucalipto afecta al rendimiento de café, en lo que concierne a los posibles efectos de competencia de raíces por nutrientes y agua; (d) si existen o no efectos alelopáticos entre las raíces de ambas especies y en qué medida la producción de exudados radicales de una especie inhibe el crecimiento de raíces o la formación de biomasa en la otra especie; (e) cómo y qué tipo de interacciones bióticas ocurren en el espacio existente entre las dos especies del sistema, en especial, que roles desempeñan las micorrizas y cuál es su contribución al sistema; (f) cuáles son las respuestas y estrategias (diferenciadas o no) de ambas especies a la disponibilidad de recursos y agua en el suelo, en qué medida afecta la distribución espacial de recursos al crecimiento de raíces; y (g) cuáles serían los efectos del manejo de raíces de los árboles dentro del sistema, tales como podas de raíces, barreras y fertilización.

Dada la amplitud y complejidad de los temas relacionados al estudio de raíces dentro del sistema agroforestal eucalipto-café, la investigación que se presenta en este documento estará orientada solamente a cuantificar y modelar los parámetros relacionados con la arquitectura y distribución espacial de las raíces gruesas y finas de los individuos que participan en este sistema agroforestal, como el primer paso que se debería dar dentro de un programa más amplio de investigaciones sobre sistemas radicales.

Esta información podrá ser utilizada en estudios posteriores sobre formas de reducir la competencia interespecífica por recursos dentro del sistema agroforestal eucalipto-café, en especial si se llegan a identificar traslapes de raíces finas entre ambas especies. También permitirá modelar los patrones arquitectónicos de raíces de los árboles cuando crecen en asocio, lo cuál se pretende sirva para predecir la forma, profundidad y extensión horizontal del aparato radical a partir de mediciones realizadas cerca del cuello de la raíz, reduciendo la necesidad de tomar muestras destructivas de raíces. Todo esto podría tener aplicaciones no sólo en investigaciones sobre competencia vegetal por recursos edáficos, sino también en otros campos; como por ejemplo, en estudios sobre fisiología vegetal, ciclaje de nutrientes, microbiología del suelo, secuestro de carbono y otros donde sea necesario estimar el arreglo espacial de las raíces y sus parámetros característicos.

En el marco de las nuevas prioridades de investigación del CATIE, el estudio contribuye a identificar una parte importante de los aspectos biofísicos de los sistemas de producción que involucran a especies forestales maderables con cultivos perennes. Da argumentos técnicos para definir el manejo de la fertilidad del suelo, la nutrición vegetal y sugerir densidades y arreglos apropiados de plantación de eucaliptos asociados al café. También constituye un insumo de información para establecer los impactos a corto y largo plazo de la competencia por recursos edáficos, así como la viabilidad de los sistemas agroforestales simultáneos eucalipto-café frente a otras alternativas.

Objetivo General

Identificar los patrones arquitectónicos y la distribución espacial de las raíces de *E. deglupta* dentro de un sistema agroforestal con café en la región del Valle Central de Costa Rica, para sugerir métodos de manejo del árbol que reduzcan los efectos de competencia a nivel de raíces entre el cultivo y el árbol.

Objetivos Específicos

a) Caracterizar y describir la arquitectura radical del eucalipto dentro del sistema agroforestal.

b) Evaluar cuantitativamente la probabilidad de competencia por recursos del suelo de acuerdo a los tipos de distribución espacial de las raíces finas (<2 mm) de las especies presentes en el sistema agroforestal.

c) Probar la modelación de la arquitectura y crecimiento de raíces con base en el ajuste de los datos de campo a los siguientes modelos biomatemáticos: (i) patrones de ramificación por fractales; (ii) relaciones funcionales entre la longitud, superficie y masa de raíces finas como variables dependientes con la profundidad del suelo y la distancia radial horizontal de la base del tronco como variables independientes, y (iii) relaciones alométricas entre parámetros radicales y parámetros de la parte aérea (diámetro a la altura de pecho y área basal)

Hipótesis

Primera hipótesis nula: la variabilidad cuantitativa de la morfología de las raíces de *E. deglupta* impide identificar sus patrones arquitectónicos (longitud de raíces secundarias, patrones de ramificación, amplitud radial, profundidad de enraizamiento, diámetros, forma y % de raíces verticales/horizontales) con un 10% de significación, suponiendo que estos parámetros se distribuyen normalmente.

Segunda hipótesis nula: no se presentan asociaciones significativas al 10% entre las raíces finas del eucalipto y del café ni por estratos de profundidad ni a nivel global.

Tercera hipótesis nula: los datos experimentales no se ajustan con un 10% o menos de significación a alguno de los siguientes modelos matemáticos para describir la arquitectura y la distribución espacial de las raíces: (a) patrones de ramificación por fractales; (b) relaciones funcionales entre la longitud, superficie y masa de raíces finas como variables dependientes con la profundidad del suelo y la distancia radial horizontal de la base del tronco como variables independientes, y (c) relaciones alométricas entre parámetros radicales y parámetros de la biomasa aérea: altura, diámetro y área basal.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1 ¿POR QUE ESTUDIAR SISTEMAS RADICALES? APUNTES SOBRE LA INVESTIGACION DE RAICES DENTRO DE SISTEMAS AGROFORESTALES.

La importancia del estudio de raíces radica en las variadas funciones fisiológicas de este órgano: (a) en la nutrición vegetal, su funcionamiento guarda una relación directa con las cantidades y calidad de biomasa útil cosechable que se va acumulando durante la estación de cultivo; (b) como órgano de reserva de nutrientes, tanto mediante modificaciones ecomorfológicas especializadas como en los tejidos radicales ordinarios; (c) como órgano de sostén, distribuyendo ramificaciones en el suelo de manera de asegurar el mejor anclaje posible de la planta; (d) como órgano involucrado en la regulación fisiológica de la planta, produce una serie de sustancias específicas capaces de favorecer, no solamente el crecimiento de órganos aéreos, sino también de promover cambios cualitativos en el desarrollo de la planta, como la iniciación de estolones o la liberación de yemas axilares de la dominancia apical (Russell, 1977), etc. Santantonio (1990) enfatiza la necesidad de considerar por separado las raíces leñosas de las raíces finas, debido a que tienen características muy diferentes de crecimiento, mortalidad y función; las raíces leñosas están más asociadas a la función de soporte mecánico de la planta y proveen la red de conducción de las sustancias asimiladas por las raíces finas en diferentes micrositios del suelo.

Si la fisiología y funciones de las raíces a nivel de plantas individuales han sido sujetas de un estudio bastante profundo, aún existen pocas evidencias respecto a los tipos de interacciones que tienen lugar entre raíces de diferentes plantas, sean éstas de la misma especie o no. En la práctica, uno de los principales efectos de la interacción entre raíces es la competencia por recursos y por condiciones óptimas de vida para este órgano vegetal en el suelo. El acercamiento a la problemática de competencia radicular puede realizarse por lo menos desde dos perspectivas: (a) una centrada en aspectos biofísicos y fisiológicos de raíces de algunos cultivos específicos, y (b) una perspectiva ecológica en que se intenta averiguar la causalidad de la competencia radicular y la complejidad de las relaciones entre los diferentes componentes bióticos y abióticos del ecosistema en que habitan las raíces.

El enfoque biofísico ha contado tradicionalmente con varios seguidores, como ejemplo se pueden citar los trabajos de Gillespie (1989), Grigal (1990) y Passioura (1981). Las dificultades metodológicas y la complejidad de relaciones ecosistémicas asociadas al enfoque ecológico han

constituido una barrera para la realización de mayores investigaciones; el trabajo de Sanford y Cuevas (1996) da una buena visión sobre el avance de la investigación de raíces en ecosistemas forestales tropicales. Es importante realizar mayores estudios sobre competencia radicular para el desarrollo de sistemas sostenibles de producción agrícola, tales como los sistemas agroforestales.

Los sistemas agroforestales no son otra cosa que arreglos temporales y/o espaciales de varios cultivos, de los cuales al menos uno es una especie leñosa (Huck 1983). El objetivo principal de la agroforestería es incrementar la productividad global del sistema de uso de la tierra y/o su sostenibilidad a través de la promoción de interacciones positivas y la reducción de las negativas entre los componentes bióticos del agroecosistema y de éstos con sus componentes abióticos.

Van Noordwijk y Purnomosidhi (1995) clasifican cinco tipos principales de sistemas agroforestales de acuerdo al grado de traslape de los cultivos en tiempo y espacio; en la dimensión temporal, los diferentes arreglos pueden variar de sistemas secuenciales a sistemas simultáneos, mientras que en la dimensión espacial se tienen sistemas separados, zonificados y totalmente mezclados. Por ejemplo, el sistema café-eucalipto en el Valle Central es simultáneo en el tiempo y totalmente mezclado en el espacio, lo cual implica maximizar las interacciones entre las especies.

De acuerdo a los objetivos planteados, los estudios de raíces pueden ser necesarios en sistemas secuenciales, por ejemplo, para saber cómo será utilizada la materia orgánica dejada por las raíces de un cultivo previo en el suelo. No obstante, tiene mayor interés estudiar raíces en sistemas simultáneos o de relevo debido a que en ellos ocurre una interacción de raíces vivas donde pueden darse complejas relaciones tanto de competencia como de complementariedad, casi siempre ligadas a la participación de otros organismos de la biota del suelo o edafón sobre la superficie de las raíces (rizoplano) o en sus inmediaciones (rizosfera). Además también existe en estos sistemas un cambio de raíces finas en el suelo permanente y de intensidad periódica que aporta materia orgánica localizada cerca de las zonas donde crecerán las nuevas raíces; la pérdida de pelos absorbentes y de las raíces más finas ocurre como resultado de su envejecimiento después de cierto tiempo de funcionamiento activo. De alguna manera, los mecanismos fisiológicos de control del crecimiento de la planta tienden a favorecer el crecimiento de ápices radicales en las regiones más favorables del suelo (Huck, 1983).

Los estudios de raíces pueden además justificar mejoras en los sistemas de manejo y diseños existentes o la necesidad de implementar nuevos sistemas; al implementar un nuevo sistema agroforestal se procura que las raíces de los diferentes componentes interactúen positivamente. En la práctica, siempre van a existir ventajas y desventajas para cada diseño agroforestal: toda mejora en la fertilidad y estructura del suelo, bombeo de nutrientes y reducción de pérdidas de recursos por lixiviación estará acompañada por algún grado de competencia, tal vez un efecto alelopático o transmisión/difusión de plagas y enfermedades. Schroth (1995) plantea cuatro posibles estrategias para enfrentar este dilema: (a) selección de especies forestales con baja competitividad radical, (b) selección de especies forestales con una distribución de raíces complementaria a la del cultivo, (c) reducción de la densidad radical del árbol usando trincheras o mediante labranza del suelo, y (d) rotaciones agroforestales cuando los efectos negativos de la asociación no pueden ser manejados en el espacio. Para mejorar ciertos diseños específicos también se podrían aplicar métodos numéricos y modelaje matemático, siempre y cuando exista suficiente información confiable; por ejemplo técnicas como la programación lineal permitirían optimizar ciertas densidades de siembra o métodos de manejo con la función objetivo de reducir al mínimo las interferencias por competencia, en tanto que la simulación de la arquitectura de raíces permitiría predecir patrones de crecimiento y extensión en el suelo con la finalidad de mejorar el manejo de la plantación.

2.2 ANATOMIA, MORFOLOGIA Y ARQUITECTURA DE SISTEMAS RADICALES DE

Eucalyptus spp. Y *Coffea* spp.

Tanto el género *Eucalyptus* como *Coffea* pertenecen al grupo de las angiospermas dicotiledóneas, el primero pertenece a la familia de las Mirtáceas y el segundo a las Rubiáceas. La anatomía de las raíces de estos géneros es bastante parecida; su morfología y arquitectura¹ se diferencian bastante uno de otro.

¹ En este estudio, el término morfología se refiere a la forma general de las raíces utilizando adjetivos descriptivos, mientras que el término arquitectura se asocia a algún atributo geométrico de la raíz, susceptible de ser medido o descrito cuantitativamente y/o que puede ser localizado en el plano o el espacio mediante sus coordenadas rectangulares o polares

2.2.1 DESCRIPCION ANATOMICA DE LAS RAICES DE LAS DICOTILEDONEAS EN EL EJEMPLO DE *Eucalyptus* spp. y *Coffea* spp.

A partir del desarrollo de la radícula del embrión, los sistemas radicales de *Eucalyptus* spp. y *Coffea* spp. presentan dos etapas de crecimiento: (a) una etapa de crecimiento primario que generalmente dura menos de un año, en que los tejidos meristemáticos crecen fundamentalmente en longitud, y (b) varias etapas de desarrollo secundario, en las cuales, además de cierto crecimiento en longitud, se produce también un engrosamiento radial de las raíces.

La raíz primaria está formada a partir del ápice por: (a) una zona embrional de tejido meristemático rodeada por la cofia o pilorriza, (b) una zona de elongación, (c) una zona de pelos radicales y (d) una zona de suberización. Un rasgo distintivo del crecimiento primario es que las paredes celulares aún no contienen acumulaciones de suberina, celulosa, lignina u otras sustancias que engrosen las paredes celulares de los tejidos y los transformen.

Un corte transversal de las raíces primarias de *Eucalyptus* spp. y *Coffea* spp. muestra la estructura básica de tejidos radicales primarios de las dicotiledóneas, de afuera hacia el centro: (a) una epidermis monoestratificada o epiblema, (b) el anillo de células de la exodermis rodeando a (c) un parénquima con muchos espacios intercelulares conocido como cortex primario, a continuación se dispone un anillo de células denominado (d) estereoma que limita al anillo interno de (e) la endodermis o periciclo; ésta a su vez encierra los tejidos conductores primarios, (f) el floema primario que envuelve al (g) xilema primario, típicamente dispuesto en rayos y limitados por un tejido meristemático lateral denominado (h) cambium (Esau, 1977).

El crecimiento secundario está acompañado por una suberización de varios tejidos; así, las células del epiblema van muriendo y las paredes de las células de la exodermis empiezan a acumular suberina. En etapas posteriores, el cortex primario desaparece o es suplantado por células muertas por acumulación de suberina; el floema es relegado a una capa delgada en la parte externa, mientras que los anillos de xilema van ocupando una gran parte del área del corte transversal. Entre ambos tejidos conductores permanece activa una capa de tejido meristemático secundario, el cual da origen a nuevos anillos anuales de madera.

2.2.2 ESTRUCTURA Y ARQUITECTURA DE LA RAIZ DE *Eucalyptus* spp.

Las diferentes especies de *Eucalyptus* desarrollan raíces axonomorfas o pivotantes que, en el caso de *E. regnans* pueden sobrepasar un metro de profundidad durante el primer año

(Ashton, 1975) y profundizar hasta los 4.16 m. en plantaciones de híbridos de 16 años (Dabral *et al.*, 1987), aunque Dhyani *et al.* (1990) reportan que raíces de plantas de 28 meses de edad de *E. tereticornis* ya habían penetrado a 4.15 m de profundidad. En plantaciones de *E. globulus* de 1, 2 y 6 años, en Portugal, se observó que un 35.2% y 40.6% de la biomasa radical total se concentra en los estratos de 0-20 cm y de 20 a 50 cm de profundidad respectivamente, mientras que con un tratamiento combinado de riego y fertilizante líquido durante la estación seca, el 51.1% de la biomasa radical total se concentró en los primeros 20 cm superficiales (Fabião *et al.*, 1995). Resultados similares son reportados por Baldwin y Steward (1987) para raíces de *E. grandis* de 4 y 6 años regadas con agua reciclada, en dos sitios del noroeste de Australia, donde el 44 y 43% de la masa radical total se concentró entre los 10 a 20 cm de profundidad. Cabe resaltar que la distribución vertical de la densidad de longitud de raíces (cm lineales de raíces por cada cm cúbico de suelo, del inglés "root length density"; Anderson e Ingram, 1993), se concentró mas bien en la capa superficial del suelo con el 47 y 53% del total en los primeros 10 cm.

Los datos anteriores sugieren que, en general, los sistemas radicales de las diferentes especies de eucaliptos tienen un crecimiento más concentrado en la parte superficial del suelo y que solo la raíz pivotante principal puede llegar a profundizar en el suelo si las condiciones del sustrato lo permiten. En cambio, las raíces laterales que se forman cerca de la superficie pueden explorar el terreno en dirección horizontal hasta en un radio de 12 m. (Dabral *et al.*, 1987). Sin embargo, la morfología de las raíces es diferente para cada especie en condiciones similares de suelo, acceso a nutrientes y humedad. Por ejemplo, después de cinco meses de haber germinado, en condiciones similares de suelo, la raíz de *E. gummifera* pesó 1.17 gr., enraizó a una profundidad de 80.4 cm. y presentó una relación raíz:vástago de 0.44, mientras que la raíz de *E. saligna* pesó 4.09 gr., alcanzó una profundidad de 95.9 cm. y mostró una relación raíz:vástago de 0.69 dentro de un ensayo de crecimiento primario de ocho especies de eucaliptos (Neave y Florence, 1994).

Diferentes especies de eucalipto reaccionan de manera diferenciada a restricciones de crecimiento radical; en un experimento efectuado durante 10 meses, sembrando plantones de tres meses de edad de varias especies de eucaliptos en recipientes de distintas capacidades, Reis *et al.* (1989) constataron que el crecimiento de la copa de *E. camaldulensis* no era afectado por la restricción de espacio que impusieron los recipientes; *E. camaldulensis* y *E. cloeziana* presentaron una elevada capacidad de recuperación después de ser trasplantados de los

recipientes al suelo, mientras que *E. grandis* toleró menos dichas restricciones, presentando un crecimiento restringido en su parte aérea y se recuperó con mayor dificultad al ser liberada al campo. Cuando se probaron estos tratamientos con riego intermitente, *E. grandis* reaccionó favorablemente en los recipientes más grandes, mientras que el crecimiento de *E. camaldulensis* fue mayor a las otras especies en los recipientes pequeños.

Además de las restricciones espaciales, que en condiciones naturales pueden encontrarse en suelos "esqueléticos" o pedregosos, el crecimiento de las raíces depende de la densidad del suelo; en suelos más densos se puede esperar una menor profundidad de enraizamiento con raíces finas distribuidas en los estratos más superficiales. Neave y Florence (1994) encontraron que con un aumento de la densidad aparente del suelo de 1 a 1.4 g/cm³ la profundidad de crecimiento de raíces de plántulas de *E. maculata* y *E. pilularis* tuvo una reducción significativa ($p < 0.01$); lo mismo ocurrió con la biomasa de raíces finas del estrato superficial (0-15 cm).

Una característica importante de *Eucalyptus* spp. es la formación en la parte subterránea del tallo, en el límite con el cuello de la raíz, de unas protuberancias denominadas lignotubérculos que sirven como órganos de reserva, pero también son capaces de producir abundantes rebrotes si la parte aérea de la planta ha sido destruida. Algunas especies como *E. grandis* no producen lignotubérculo, sino una zona engrosada que cumple las mismas funciones; en ambos casos se trata de estructuras caulinares (FAO, 1981).

2.2.3 ESTRUCTURA Y ARQUITECTURA DE LA RAÍZ DE *Coffea* spp.

La raíz del café es pivotante y leñosa, presentando una raíz principal recta cuando está bien formada aunque deja de profundizar si choca con algún obstáculo; de la raíz principal nacen raíces secundarias en sentido horizontal u oblicuo, si se despunta la raíz principal se promueve una mayor brotación de raíces secundarias (Blanco s/f). La raíz principal alcanza una profundidad de 1.9 a 2.5 m (Franco e Infortazo 1946), aunque las profundidades medias estarían en el rango de los 0.4 a 0.9 m con una extensión horizontal superficial que fluctúa entre los 1.35-1.65 m (Bermúdez 1954).

Como es de esperar, la distribución de las raíces finas decrece con la profundidad; en excavaciones realizadas en una plantación de café con una elevada diversidad de árboles de sombra, en Venezuela (Cuenca *et al.*, 1983), una tercera parte de la biomasa de raíces finas fue

encontrada en los primeros 10 cm de profundidad, mientras que a los 30 cm de profundidad ya se había acumulado el 73% de las raíces finas.

2.3 ARQUITECTURA DE RAICES

Con fines prácticos, la arquitectura de raíces se refiere fundamentalmente a la forma en que se distribuyen las raíces leñosas en el espacio y su posición relativa con respecto a un sistema de coordenadas (de referencia). De manera formal, un sistema de coordenadas consta de un punto de origen O, fijado en el espacio y tres rectas (o vectores) perpendiculares entre sí que se intersectan en el punto O, de manera que a cada otro punto en el espacio le corresponda una y solamente una posición que puede ser descrita en términos de sus coordenadas rectangulares o polares (Bronshtein y Semiandsev 1986).

La arquitectura de raíces se puede definir como el estudio de las formas estructurales producidas por la raíz en un estado ontogénico determinado y a una edad determinada, como resultado de la presión ejercida contra el suelo por los ápices radicales empujados por la acción de tejidos meristemáticos activos. Por otro lado, la naturaleza de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo influyen y frecuentemente determinan los tipos morfológicos de las raíces. Los sistemas radicales son, en definitiva, objetos geométricos complejos, dentro de los cuales la adquisición y utilización de recursos (p.e. C) no son uniformes y que además interactúan dinámicamente con un ambiente edáfico espacial y temporalmente heterogéneo (Wullschleger *et al.*, 1994).

El crecimiento primario de la raíz ocurre en raíces nuevas, jóvenes y se caracteriza por una elevada plasticidad y movilidad. En esta etapa la raíz adquiere su forma definitiva, cuando en su recorrido evita los obstáculos en el suelo y se alarga por el ápice hacia los sitios donde existen mayores concentraciones de recursos. Durante el crecimiento secundario, la raíz prácticamente ya no cambia de forma, el engrosamiento lateral en anillos se sucede año tras año sin alcanzar a modificar las formas previamente establecidas por el recorrido de las raíces primarias. En una revisión sobre los principales factores que afectan al crecimiento primario y secundario de las raíces, Coultts (1987) constata la existencia de relaciones de competencia entre las raíces pivotantes y laterales de una misma planta y que la dominancia de alguna de ellas se establece en etapas tempranas de desarrollo de la planta. Por su parte, el crecimiento desigual de las raíces laterales es influenciado por el ambiente local de las raíces de estructura primaria, es decir el

crecimiento de las raíces primarias será diferente en ambientes ricos en recursos o en ambientes pobres; reflejando una elevada especificidad en la forma de las raíces.

No obstante, pese a estas fuentes de variación, estudios recientes en especies anuales y leñosas revelan posibilidades de identificación y modelación de patrones arquitectónicos relativamente simples en sistemas radicales.

El objetivo del análisis arquitectural es identificar la naturaleza, estructura y el arreglo relativo de cada parte de la planta en un período dado para caracterizar los procesos internos de crecimiento que los determinan (Jourdan *et al.*, 1995). La manera y velocidad con que la raíz va explorando y ocupando el espacio influye en o determina muchas de las funciones fisiológicas de la raíz (p.e. sostén y nutrición); en los sistemas agroforestales, el conocimiento y entendimiento del desarrollo arquitectónico de los árboles es de máxima importancia (De Reffye *et al.*, 1995).

El análisis de la arquitectura de las raíces se puede enfocar desde distintos puntos de vista, de acuerdo a los objetivos del estudio, a continuación se presentan algunas de las múltiples aplicaciones que tiene esta metodología en diversos campos de la investigación, incluyendo la parte agroforestal.

Deans (1981) realizó una descripción detallada de los patrones arquitectónicos de raíces de *Picea sitchensis*, agrupó todas las raíces leñosas (diámetro > 0.5 cm) en varias clases diametrales y calculó el peso de cada clase diametral. También registró las distancias de las raíces con respecto al árbol, encontrando que la distribución de la biomasa de raíces leñosas decrece con la distancia al árbol. Coutts (1983) realizó un análisis arquitectural de raíces en función de su resistencia a la ruptura y estabilidad de los árboles, encontrando que la resistencia de las raíces varía con las especies, depende fuertemente de la forma y tipos de ramificaciones. Posteriormente, Stokes *et al.* (1996) construyeron modelos artificiales de sistemas radicales a fin de probar la resistencia y eficiencia de anclaje de diferentes arquitecturas; los factores determinantes en la resistencia de la planta a ser extraída fueron la profundidad de enraizamiento y la longitud radial (horizontal) de las raíces, el patrón de ramificación más eficiente resultó aquel que presenta muchas ramificaciones en profundidad y el mejor ángulo entre la raíz pivotante y la raíz lateral es de 90°. Cremer (1993) constató que el engrosamiento de la raíz de eucalipto, cerca de la base del tallo y en las inmediaciones de los puntos de ramificación, en los sitios donde las raíces están sujetas a tensiones mecánicas debido al balanceo del árbol, existe una acumulación de madera medular, lo cual está de acuerdo con la sugerencia de que la madera adicional que crece

para soporte mecánico se convierte en tejido medular porque excede las necesidades de conducción y almacenamiento.

Van Noordwijk *et al.*, (1994); Spek y Van Noordwijk (1994); Van Noordwijk y Purnomosidhi (1995) probaron la modelación de sistemas radicales empleando la teoría de fractales. Según esta teoría, ciertos patrones de ramificación deben ocurrir en la raíz independientemente de los órdenes de ramificación, haciendo posible predecir la longitud y biomasa de la raíz a partir de la medición de su diámetro proximal y la identificación de un par de factores de proporcionalidad. Los resultados muestran que este modelo puede ser aplicado al menos como una aproximación, pero se debe prever la alta variabilidad de los factores de proporcionalidad.

Pellerin y Pagès (1994) y Pagès y Pellerin (1994) estudiaron las curvas de elongación de raíces axilares en maíz, así como el número, crecimiento y ramificación de raíces laterales de primer orden. En el primer caso, los datos se ajustaron a un modelo matemático en que la tasa de elongación declina con la edad de la raíz (modelo de elongación monomolecular). En el segundo caso, la fuerte heterogeneidad de longitudes de raíces laterales y densidades de ramificación fue interpretada como una forma adaptativa y económica en que la planta explota el ambiente que rodea a las raíces principales.

En cuanto a la influencia de los factores del medio sobre la arquitectura de raíces, Crabtree y Bernston (1994) investigaron el efecto de dos formas de nitrógeno inorgánico -nitrato y amonio-, en la arquitectura de raíces de *Betula lenta*, la cual fue representada mediante parámetros de densidad, longitud y topología; como resultado encontraron que los mayores efectos en la arquitectura de la raíz se deben a la aplicación simultánea de nitratos y amonio, lo cual se expresa en una mayor longitud de segmentos de raíz y patrones de ramificación más simples.

A fin de determinar la influencia conjunta de los factores de sitio, Dhyan *et al.*, (1996) analizaron la arquitectura de la raíz de *Eucalyptus tereticornis*, estimaron su biomasa y la relación vástago:raíz en dos sitios con diferencias aparentemente enormes en cuanto a potencial productivo, pero no encontraron diferencias significativas en las variables de respuesta.

El análisis arquitectural es también muy útil para el diseño de sistemas agroforestales, como lo prueban Toky y Bisht (1992), quienes caracterizaron la arquitectura de raíces de 12 especies arbóreas (nueve nativas y tres exóticas) en la zona árida del noroeste de India; los

parámetros estimados fueron: la morfología general, extensión horizontal, extensión vertical, ángulos de raíces primarias y secundarias, número de raíces primarias, diámetro y longitud de las raíces, biomasa total y relación raíz:vástago; los datos que presentan muestran una amplia variación de profundidades de crecimiento y extensión lateral de raíces, en función de información genética de las especies pero también identificando efectos ambientales en los patrones de crecimiento de las raíces; por ejemplo, raíces más profundas son asociadas a climas secos y raíces superficiales a climas húmedos. A diferencia de la mayoría de las especies estudiadas, dos de ellas, *Prosopis cineraria* y *Acacia catechu* tenían una distribución uniforme de densidad de raíces en profundidad, lo que los autores identifican como una adaptación a las condiciones de aridez de la región.

Por su parte, Ruhigwa *et al.* (1992) analizan las características de enraizamiento de cuatro especies leñosas potencialmente utilizables en cultivos en callejones en términos de los siguientes parámetros: abundancia y biomasa total de raíces así como el número de raíces leñosas en diferentes profundidades. El análisis mostró que *Acioa barteri* es la especie que muestra mejores patrones de enraizamiento para cultivo en callejones con un 19% de la densidad de longitud total de raíces finas en el estrato superficial del suelo (0 a 20 cm), en contraste con valores como 60% para *Cassia siamea* o 50% para *Gmelina arborea* a una misma profundidad. Además, las raíces finas de *A. barteri* están concentradas cerca de la base del tronco y penetran más profundo en el suelo, lo cual permite suponer que la arquitectura de la raíz de esta especie la hace eficiente en el ciclaje de nutrientes y poco competitiva con las raíces superficiales de los cultivos dentro de un sistema en callejones.

2.4 GENERALIZACIONES EN EL ESTUDIO DE SISTEMAS RADICALES: EVOLUCION METODOLOGICA Y MODELACION MATEMATICA

Existen dos tipos de limitaciones al estudio de campo de sistemas radicales. Una de ellas está asociada a la variabilidad fenotípica que caracteriza a la distribución espacial de las raíces de individuos con genotipos similares o cercanos. Las instrucciones contenidas en los cromosomas de las plantas controlan los patrones arquitectónicos y de crecimiento de las raíces dentro del suelo, así como las estrategias a ser empleadas frente a diferentes situaciones ambientales. Sin embargo, individuos de una misma especie, con una base genética similar reaccionan de manera específica de acuerdo a la heterogeneidad de las condiciones físicas y químicas del suelo: densidad de las partículas sólidas, resistencia a la penetración, humedad,

porosidad, cantidad y localización de nutrientes, de sustancias tóxicas, etc. También influyen en el crecimiento de las raíces la competencia intra- e interespecífica con raíces de otros individuos, plagas y enfermedades, presencia y grado de desarrollo de organismos mutualistas y simbióticos (p.e. micorrizas).

Como resultado, cada genotipo expresa un fenotipo específico ante diferentes condiciones ambientales, construyendo una morfología y arquitectura determinada, que está condicionada por la variabilidad de las condiciones ambientales. En una cuenca hidrográfica, zona de producción o parcela de una finca, las condiciones existentes en los suelos presentan una variabilidad sumamente mayor a las condiciones atmosféricas; por ello, se puede esperar que los fenotipos de la vegetación natural y cultivada tengan raíces con patrones morfológicos y arquitectónicos más variados y complicados que la correspondiente parte aérea. Las longitudes, tamaños, patrones de ramificación, profundidad de enraizamiento de la raíz principal y la cantidad de ápices con zonas de pelos absorbentes es sumamente variable, inclusive para dos plantas de una misma especie creciendo en vecindad.

La otra limitación al estudio de raíces se refiere a que el medio en que crecen impide la realización de mediciones directas. Los principales problemas que se asocian a estas limitaciones consisten en la dificultad de extraer sistemas radicales completos de su hábitat natural, la gran cantidad de tiempo requerido para los estudios y la escasa significación estadística derivada de muestras pequeñas en poblaciones altamente variables. Por ejemplo, los coeficientes de variación de masa seca de raíces obtenidos en muestreos con barreno durante una gran cantidad de estudios del Instituto de Fertilidad del Suelo son muy altos (Van Noordwijk *et al.*, 1985; Anderson e Ingram 1993), pudiendo tener una mediana de 43% con un rango intercuartílico de 35-53% en pastizales y una mediana de 44% con un rango intercuartílico de 37-61% en cultivos de cereales. Por todo esto, una descripción exacta de sistemas radicales en el campo es una tarea extremadamente difícil de realizar.

2.4.1 METODOS DE ESTUDIO DE RAICES

El análisis arquitectural generalmente se ha asociado a las raíces leñosas, las cuales con frecuencia presentan estructuras estables que posibilitan trabajar sobre material extraído del suelo sin perder su configuración original. En cambio, las raíces finas tienden a ser más flexibles y frágiles; su estudio generalmente se ha realizado muestreando el área de influencia con barrenos o en trincheras, en base a una manipulación cuidadosa. Por lo tanto, la separación entre raíces

leñosas y finas fijando algún límite diametral es una decisión útil en términos metodológicos, pero no responde a ninguna causa fisiológica o morfológica.

Frecuentemente, las investigaciones sobre sistemas radicales se han efectuado mediante muestreos de raíces finas, debido a que el método de barrenamiento aplicado no es destructivo y puede emplearse de manera más amplia que otro tipo de métodos. Los métodos basados en excavaciones muestran la morfología general en un momento dado en el tiempo, pero son de escasa utilidad para estudiar los cambios de la raíz en el tiempo; mientras tanto, los rizotrones y mini-rizotrones pueden ser utilizados para estudiar el patrón temporal de ciertas raíces, pero no permiten visualizar muy claramente los patrones espaciales y distorsionan el crecimiento de las raíces; los métodos de barrenamiento y extracción de monolitos pueden usarse tanto para estudiar patrones temporales como espaciales (Hughes y Gandar, 1993). En general, estos estudios revelaron que la concentración de mayor densidad de raíces finas ocurre en las capas superficiales del suelo, con una tendencia de disminución exponencial conforme se profundiza en el suelo y conforme aumenta la distancia al tallo o tronco de la planta (Ball-Coelho *et al.*, 1992; Dierolf *et al.*, 1989; Drew y Saker 1980; Gale y Grigal 1987; Oyanagi 1994; Wilhelm *et al.*, 1982).

Como se mencionó antes, los estudios de raíces tradicionalmente se han orientado al estudio de raíces leñosas en relación a sus funciones de fijación, sostén y anclaje, y la distribución espacial y crecimiento de raíces finas, a las que se atribuye la función principal de absorción de nutrientes y agua. Las raíces leñosas se estudian principalmente mediante métodos de cavado del suelo, ya sea en trincheras, en calicatas o directamente a partir del tronco principal de la planta siguiendo la dirección de las raíces principales. Las raíces finas se estudian principalmente mediante la toma de muestras del suelo con barrenos y con monolitos.

Los estudios de raíces se inician de manera más o menos sistemática a inicios del presente siglo, siendo representativos de la época las investigaciones clásicas de Weaver (1926) y Weaver y Bruner (1927), quien describe los sistemas radicales de los principales cultivos de campo y hortalizas, así como un trabajo pionero sobre las relaciones ecológicas de las raíces en ecosistemas templados (Weaver, 1919). En sus investigaciones, Weaver utiliza básicamente el método de cavar trincheras a cierta distancia de las plantas bajo estudio para dibujar mapas de raíces, también realiza excavaciones superficiales siguiendo la dirección de las raíces principales a fin de dibujar su distribución horizontal; en ambos casos emplea cuadrícula de referencia con

base en algún punto de origen elegido en el sitio. En el estudio de relaciones ecológicas emplea colores para identificar las raíces de especies diferentes, con lo cual produce unos mapas de raíces que permiten una buena visualización de sus distribuciones espaciales.

En la época actual, dos trabajos clásicos (Schuurman y Goedewaagen, 1965; Böhm, 1979) recopilan y describen los principales métodos de estudios de raíces. De manera sorprendente, hasta la fecha no han existido cambios sustanciales en estos métodos y se los sigue empleando de manera rutinaria con algunas modificaciones orientadas básicamente a mejorar la rapidez y exactitud del conteo de raíces; por ejemplo, el método para estimar la longitud de raíces mediante el conteo de intersecciones propuesto por Newman (1966), se utiliza hasta la fecha con pocas modificaciones. Los diferentes métodos utilizados en las investigaciones de raíces arrojan resultados a veces poco confiables, por ejemplo, estimaciones realizadas sobre la producción neta de raíces dio origen a una polémica aún no resuelta: ¿Cuál es la verdadera magnitud de la biomasa radical en un ecosistema? (Vogt *et al.*, 1986; Lauenroth *et al.*, 1986). A partir de la década de los noventa se empieza a notar un cierto resurgimiento de innovaciones técnicas y metodológicas a partir, probablemente favorecido por el desarrollo de tecnologías de análisis y modelación espacial.

La abundante literatura sobre estudios de raíces permite complementar este breve esbozo histórico en cuatro temas metodológicos aún no totalmente esclarecidos y que requieren un futuro desarrollo:

- (a) las pérdidas de biomasa radical durante la manipulación de las muestras (muestreo, almacenamiento, lavado) que puede llegar al 30 a 40% de masa seca (Grzebisz *et al.*, 1989);
- (b) la carencia de procedimientos estandarizados para el muestreo de raíces con barrenamiento, aunque se hicieron ya algunos intentos en este sentido, como el estudio de Kumar *et al.* (1993) en cultivos de trigo sembrados en hileras de 22 cm.; el trabajo de Van Noordwijk *et al.* (1985) que expone varios esquemas de muestreo que minimizan los sesgos de las estimaciones para diferentes cultivos y métodos de estudio y el manual editado por Anderson e Ingram (1993) que representa ya un primer intento de estandarización.
- (c) sólo durante los últimos cinco años se realizaron varios estudios de comparación de métodos de muestreo y observación de raíces; por ejemplo, Majdi *et al.* (1992) compararon la longitud de la raíz medida con minirizotrones y muestras de monolitos, sin hallar diferencias muy

claras; Samson y Sinclair (1994); Smit *et al.* (1994) y De Ruijter *et al.* (1996) compararon barrenamiento con minirizotró. Los primeros hallaron que las estimaciones hechas a partir de las observaciones del rizotró subestiman la densidad de longitud radical; por su lado, los últimos consideran que si bien el método de barrenamiento tiene varias ventajas, el rizotró demanda menos labor, mientras que Smit *et al.* trabajando en el “Wageningen Rhizolab” consideran que un barrenamiento limitado combinado con observaciones en el minirizotró proveen estimaciones adecuadas de las propiedades radicales relevantes; Heeraman y Juma (1993) compararon los métodos del minirizotró, barrenamiento y monolito, obteniendo coeficientes de correlación significativos ($p \leq 0.01$) entre los métodos de barrenamiento y monolito para la densidad de longitud de raíces (cm/cm³) en cultivos de *Hordeum vulgare* y *Vicia faba*. Publicover y Vogt (1992) compararon varios modelos para la estimación de producción de raíces finas en base a datos obtenidos por muestreo secuencial con barreno mediante un modelo de simulación, encontrando que el método de “compartimento de flujo” fue el más exacto; Kücke *et al.* (1995) compararon cuatro métodos de estimación en tres suelos diferentes, concluyendo que el barrenamiento y el monolito arrojan las estimaciones más confiables. También se comparó la habilidad de distintos trazadores (¹⁴C, ⁸⁶Rb) y la excavación total para determinar la distribución horizontal y vertical de raíces, tomando como patrón de comparación el barrenamiento; el método del monolito correlaciona muy bien con las estimaciones obtenidas por barrenamiento, el ¹⁴C puede representar mejor la actividad radical que la biomasa aunque sobreestima las raíces superficiales y subestima las profundas, mientras que la actividad de ⁸⁶Rb es altamente variable y distribuida aleatoriamente (Milchunas *et al.*, 1992);

d) algunos de los avances tecnológicos que se vienen adoptando en el estudio de raíces, contemplan estimaciones más robustas de las intersecciones en minirizotrones (Buckland *et al.*, 1993); el procesamiento de imágenes auxiliado por computadora con técnicas de composición de colores (Heeraman *et al.*, 1993); también se propone el uso de un “scanner” tridimensional en sustitución del método de intersección de líneas para estimar la longitud de raíces muestreadas con barreno (Smit *et al.*, 1994). Por su parte, Dalton (1995) propone relacionar *in situ* la capacitancia eléctrica de la planta con la biomasa y desarrollo de las raíces, el método tiene gran potencial aunque aún se requiere mayor investigación sobre las diferentes posibilidades, calibración y ubicación de los electrodos en la planta.

2.4.2 MODELACION DE SISTEMAS RADICALES

De manera directamente proporcional al incremento de las innovaciones metodológicas, durante la presente década, la modelación de sistemas radicales ha tenido grandes avances.

La modelación de raíces tiene varios objetivos, pero talvez dos enfoques predominan durante los últimos años. El primero procura relacionar la arquitectura y distribución espacial de raíces con la presencia o ausencia de diferentes factores ambientales, especialmente nutrientes y agua, tomando un enfoque fisiológico. El segundo enfoque se centra en reconstruir los patrones morfológicos, estructurales y arquitectónicos de las raíces, sin relacionarla todavía con los factores del medio ambiente.

El enfoque fisiológico de la modelación de raíces tiene actualmente varios representantes; por ejemplo Gillespie (1989), propone una modelación mecanicista de la competencia por nutrientes entre dos cultivos intercalados. Según su modelo, existe una reducción de la concentración de nutrientes y agua en la zona adyacente a las raíces. Mediante una fórmula aproximada es posible estimar la mitad de la distancia entre raíces. Si esta distancia está por debajo de cierto límite, se supone que existe competencia entre especies. Grant (1993, a) propone un modelo matemático que relaciona los dos efectos principales de la compactación del suelo sobre el crecimiento de la raíz: la resistencia mecánica a la elongación radical y la reducción de transporte de oxígeno a las superficies de la raíz. En un siguiente trabajo valida la consistencia del modelo comparando corridas de simulación con datos reales de campo. Este modelo podría ser útil para estimar efectos sitio-específicos de compactación de suelos sobre el ciclaje de carbón en agroecosistemas (Grant 1993, b). Benjamin *et al.* (1996) proponen un modelo bi-dimensional para investigar los efectos de absorción de agua por la planta y el movimiento de agua y nitratos en el suelo, ligados a la densidad y longitud de raíces. Clausnitzer y Hopmans (1994) pasan a un enfoque tridimensional para realizar una simulación dinámica y simultánea del movimiento del agua en el suelo y el crecimiento de la planta. La morfología de la raíz observada en su hábitat natural puede ser aproximada mediante una descripción del ambiente edáfico.

Deans y Ford (1983) realizan uno de los intentos primarios para modelación de raíces con el enfoque morfológico; el modelo propuesto utiliza la reconstrucción de patrones en base a información topológica de las raíces primarias. Con el incremento de las capacidades computacionales y los nuevos avances teóricos de las matemáticas ligadas a los procesos biológicos, por ejemplo, la modelación estocástica del proceso de ramificación mediante cadenas

de Markov (Costes et al 1992) o el empleo de la geometría de fractales en las ciencias forestales (Lorimer *et al.*, 1994), la modelación morfológica de sistemas radicales tiene un nuevo impulso durante la década actual. Como ejemplos, se pueden citar el programa ROOTMAP que provee una descripción topológica tridimensional del crecimiento de sistemas radicales, habiéndose verificado sus grandes potencialidades para investigar los efectos de diferentes geometrías de raíces sobre parámetros como la densidad de longitud de raíces y el número de intercepciones de raíces en un plano de suelo horizontal o vertical, los cuales se podrían obtener cavando trincheras (Bengough *et al.*, 1992). Este programa también permite investigar las relaciones de la raíz con el ambiente edáfico, como diferentes niveles de resistencia a la penetración (Tsegaye *et al.*, 1995). Otra corriente de investigaciones trata de encontrar ciertos patrones fundamentales de crecimiento, como el trabajo de Newson *et al.* (1993), quienes lanzan la hipótesis de que la distribución de distancias entre raíces hijas podría ser multimodal y que las magnitudes de estas modas podrían ser múltiplos de alguna distancia fundamental, aunque las pruebas realizadas en *Lycopersicum esculentum* Miller todavía no dieron resultados estadísticamente concluyentes.

Pagès *et al.* (1989) presentan un modelo arquitectónico que toma en cuenta la morfogénesis de la raíz del maíz, la evolución del patrón simulado se logra en tres pasos: la emisión de nuevas raíces primarias del vástago, crecimiento y ramificación. Jourdan *et al.* (1995) modelaron el proceso de ramificación de una raíz de *Elaeis guineensis* Jacq. aplicando un proceso estocástico definido por una cadena de Markov, como un primer paso para la elaboración de un modelo estocástico de la arquitectura del sistema radical de este cultivo. Pagès y Pellerin (1996) observaron que mapas de distribución vertical de raíces simulados siguen aproximadamente los mismos patrones que mapas reales de raíces de maíz. Por su parte, Shibusawa (1994) desarrolló un modelo de crecimiento de la raíz de maíz, extendiendo la técnica de los algoritmos "L-systems" (los cuales transforman patrones complicados en patrones regulares simples) a sistemas radicales e incorporando el efecto de ciertos patrones de anisotropía en fractales², como resultado de diferentes niveles de densidad aparente del suelo. Con ello logra un modelo sofisticado que simula muy bien la arquitectura radical.

² La anisotropía en fractales es algo así como deformaciones o escalamientos diferenciados de los fractales. En términos formales, anisotropía es la dirección preferida o la dirección de mayor o menor continuidad entre dos datos puntuales. Por ejemplo, si se dibuja un plano en que la escala de ambos ejes es igual ($n_x=n_y$), el plano es isotrópico. Si en este mismo plano se coloca un factor de escalamiento a alguno de los ejes, digamos que $n_x=2n_y$, entonces ya existe un efecto anisotrópico, con un radio de anisotropía de 1:2.

También existen algunos esfuerzos por combinar el enfoque morfológico con el fisiológico; el programa SimRoot es un sistema tetra-dimensional (espacio y tiempo) de estructura de datos y visualización que simula el crecimiento de la raíz en base a parámetros morfológicos y fisiológicos de la raíz (Nielsen *et al.*, 1994).

En conclusión, la revisión bibliográfica realizada reseña los principales avances en el estudio de raíces en términos generales. Se revisaron los escasos estudios realizados sobre raíces de eucalipto cuyos enfoques tienden a ser descriptivos (Ashton, 1975; Baldwin y Stewart, 1987; Dabral *et al.*, 1987) o a explorar tópicos relacionados con la fisiología de raíces (Neave y Florence, 1994; Fabiao *et al.*, 1995); no se encontró un solo intento de caracterizar la arquitectura y la distribución espacial de raíces de *E. deglupta*, a pesar de la necesidad de contar con esta información no solo para el diseño de sistemas agroforestales, sino también en plantaciones puras.

Los estudios más generales revisados aportan muchas pautas metodológicas sobre el análisis arquitectural de raíces reforzando una hipótesis general referida a que el intrincado sistema ramificado aparentemente aleatorio en que crecen las raíces puede ser modelado por leyes geométricas más simples. A partir de esta hipótesis general, la presente investigación buscará ajustar los datos experimentales a algunos de los modelos propuestos, tal como se formula en la tercera hipótesis nula. Otro aporte metodológico de la literatura revisada consiste en haber definido los patrones arquitecturales a ser medidos en eucalipto, de manera de contar con una descripción adecuada del sistema radical.

3. METODOLOGIA

3.1 DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

El presente trabajo de tesis se realizó en tres sitios del Valle Central de Costa Rica:

a) Una parcela experimental ubicada en la finca del Instituto de Investigaciones del Café (ICAFFE) en la localidad de San Pedro de Barva, Heredia. Las coordenadas del sitio son 10°02' Norte y 84°09' Oeste. La parcela mide 1877 m² y tiene una plantación de café con 37 árboles de siete años de *E. deglupta*.

b) Tres parcelas en la finca "Rosario", ubicadas en las inmediaciones del peaje a la par de la carretera primaria No. 1, a unos 5 km. de la localidad de Naranjo, Alajuela. Las coordenadas del sitio son 10°04' Norte y 84°23' Oeste. En conjunto, las tres parcelas miden 1.8 hectáreas presentando plantaciones de café con árboles de eucalipto de 4, 5 y 6 años.

c) Una parcela de la finca "Sacramento", ubicada en la localidad de Naranjo, Alajuela. Las coordenadas del sitio son 10°05' Norte y 84°23' Oeste. La parcela mide algo más de dos y media hectáreas y se encuentra con una plantación nueva de café y eucalipto de un año.

Los sitios están ubicados en la zona cafetalera Central de Costa Rica (Oficina del Café, 1983), la cual presenta un clima estacionalmente seco, con cuatro a cinco meses secos entre diciembre-enero y abril-mayo y con una precipitación anual de 2000 a 2600 mm. La temperatura promedio anual es de 20°C (Barrantes *et al.*, 1985).

La altitud de los tres sitios varía de 950 a 1050 msnm. Según la clasificación de Holdridge, los sitios se ubican en la zona de vida bosque húmedo premontano tropical (Bh-P). Según la zonificación agroecológica para el cultivo de café (Rojas, 1987), la probabilidad de obtener buenos rendimientos en el lugar es "Muy Alta", lo que significa que las condiciones de sitio, suelo, clima y fisiografía son óptimas para el cultivo del café y que no existen limitantes generales fisico-edáficas. Los tres sitios se encuentran dentro de la zona agoclimática de Clase 1 para la producción de café.

El suelo en los sitios tiene en general una textura franca a franca arenosa, en especial en la capa superficial, a medida que se profundiza puede presentar ciertos grados de compactación, no de manera gradual, sino por la presencia de capas bien delimitadas, lo cual se debe a las características volcánicas de la pedogénesis de los sitios.

Las tres parcelas de la finca "Rosario" presentan condiciones fisiográficas similares, con la pendiente orientada al Sur-Este, no obstante, las condiciones edafológicas pueden ser variables, incluso dentro de una misma parcela, debido a que se trata de suelos volcánicos, con depósitos de cenizas en varias épocas, formando capas de diferentes espesores y diferentes grados de compactación. El anexo A muestra las características principales de los perfiles de suelo de dos parcelas de la Finca "Rosario", el cual fue clasificado como andisol. La parcela de "Sacramento" tiene una fisiografía de ladera con pendientes variables y en general orientadas al Sur-Este, también esta parcela tiene suelos volcánicos identificados como andisoles por técnicos de ICAFE (ICAFE-CICAFE, 1996). La parcela de ICAFE está ubicada en un sitio plano, con un suelo clasificado como andisol proveniente de cenizas volcánicas.

3.2 MANEJO AGRONÓMICO DE LAS PARCELAS

Las parcelas fueron establecidas en diferentes épocas y utilizando diferentes tipos de material de siembra. El cuadro 3.1 presenta la información general correspondiente al manejo de las parcelas.

Las plántulas de café fueron obtenidas de viveros de finqueros de la zona, los cuales emplearon semilla certificada distribuida por ICAFE. En todos los casos las raíces de las plántulas de café fueron podadas antes de la siembra definitiva (transplante). Por su parte, las plántulas de eucalipto fueron adquiridas de un vivero del MAG (Ministerio de Agricultura) ubicado en Tres Ríos para el caso de las fincas de Naranjo y de la Dirección Forestal del MAG en San José para el caso de ICAFE. En general, las plántulas de eucalipto tenían alrededor de 30 a 45 cm de alto cuando fueron recibidas en los sitios, en bolsas de unos 20 cm de largo y su edad fluctuaba entre los 3 a 4 meses desde la germinación de la semilla. Las raíces de las plántulas de eucalipto no fueron podadas al repique.

El manejo de la nutrición vegetal es uno de los aspectos a los que mayor atención prestó el finquero por su relación directa con los niveles de rendimiento del café. Los cuadros 3.2 y 3.3 presentan los detalles del programa de fertilización mineral que se aplica en los sitios.

Cuadro 3.1 Información general sobre el manejo de las plantaciones

Descripción	Finca "Rosario" Tronco Planes	Finca "Rosario" Corte del Pifial	Finca "Rosario" Lopez Nuevo	Finca "Sacramento"	Parcela de ICAPE
Edad del café en la plantación (años)	10	10	9	1	7
Edad del eucalipto en la plantación (años)	4	5	6	1	7
Forma de establecimiento del eucalipto	después de recepa de café	después de recepa de café	después de recepa de café	plantación simultanea	plantación simultanea
Variedad de café	catuai rojo	catuai rojo	catuai rojo	Costa Rica 95	catuira
Genotipo de eucalipto (<i>E. deglupta</i>)	brotes rojos	brotes rojos	brotes rojos	desconocido	brotes rojos
Uso anterior de la tierra	caña	caña	caña+café	café	café
Preparación del terreno	mecanizada (arado)	mecanizada (arado)	manual	manual	manual
Fecha de establecimiento de la plantación	junio/87	junio/87	junio/88	junio/96	julio/90
Densidades					
Número de plantas de café/ha	5540	5540	5540	7086	5540
Número de árboles/ha	173	173	173	100	173
Distancias de siembra(entre hileras y entre plantas, en m)	1.90 X 0.95	1.90 X 0.95	1.90 X 0.95	1.68 X 0.84	1.90 X 0.95
Café	7.60 X 7.60	7.60 X 7.60	7.60 X 7.60	10 X 10	7.60 X 7.60
Eucalipto	en la calle	en la calle	en la calle	en la calle	en la calle
Ubicación del eucalipto					

Cuadro 3.2 Programa de fertilización para café en desarrollo (1er. año) utilizado en los sitios

Sitios y Calendario	Producto	Dosis	Forma de aplicación
Parcelas finca "Rosario"			
-15 días después de siembra	10:30:10	24 g/mata	al voleo ¹
- mediados a fines de agosto	18:3:10:8 (Mg) ó 18:3:10:8(Mg):2(B)	40 g/mata	al voleo
- mediados a fines de agosto	Cu+Zn+B ²	-.-	atomización foliar
-mediados a fines de octubre	33 N(nutran)	40 g/mata	al voleo
-fines de octubre	Cu+Zn+B	-.-	atomización foliar
Parcela finca "Sacramento"			
-15 días después de siembra	10:30:10	24 g/mata	al voleo
- mediados a fines de agosto	18:3:10:8 (Mg)	40 g/mata	al voleo
- mediados a fines de agosto	Cu+Zn+B	-.-	atomización foliar
-mediados a fines de octubre	33 N(nutran)	40 g/mata	al voleo
-fines de octubre	Cu+Zn+B	-.-	atomización foliar
Parcela ICAFE			
- al momento de la siembra	10:30:10 + (NH ₄) ₂ SO ₄ + furadan ³	30 g de fertili- zante+ 10 g de insecticida por mata	al fondo del hueco del café
- mediados a fines de agosto	18:3:10:8 (Mg)	70 g/mata	al voleo
- mediados a fines de agosto	Cu+Zn+B	-.-	atomización foliar
-mediados a fines de octubre	33 N(nutran)	70 g/mata	al voleo
-fines de octubre	Cu+Zn+B	-.-	atomización foliar

¹ La aplicación al "voleo" consiste en distribuir el fertilizante sobre el suelo con recipientes plásticos de 40 g.

² Ocasionalmente se utilizan también multiminerales, metalosatos y quelatos, para suplir deficiencias específicas de microelementos.

³ Nematicida de amplio espectro.

Cuadro 3.3 Programa de fertilización para café en producción vigente en los sitios estudiados

Calendario	Producto	Dosis	Forma de aplicación
Parcelas finca "Rosario"			
- junio (un mes después de inicio de lluvias)	18:3:10:8:2:30 (N:P:K:Mg:B:S; fórmula completa)	40 g/mata	al voleo
- fines de junio	Cu+Zn+B	-.-	atomización foliar
- mediados de agosto	18:2:15:4:2:15 (N:P:K:Mg:B:S)	40 g/mata	al voleo
- fines de agosto	Cu+Zn+B	-.-	atomización foliar
- mediados de octubre	33N(nutrán) ó 33:45 (N:S)	40 g/mata	al voleo
- mediados de octubre	Cu+Zn+B	-.-	atomización foliar
Parcela "Sacramento" (fertilización prevista)			
- inicios de junio	18:3:10:8:2:30 (N:P:K:Mg:B:S; fórmula completa)	40 g/mata	al voleo
- fines de junio	Cu+Zn+B	-.-	atomización foliar
- mediados de agosto	18:2:15:4:2:15 (N:P:K:Mg:B:S)	40 g/mata	al voleo
- fines de agosto	Cu+Zn+B	-.-	atomización foliar
- mediados de octubre	33N(nutrán)	40 g/mata	al voleo
- mediados de octubre	Cu+Zn+B	-.-	atomización foliar
Parcela ICAFE			
- junio	18:5:15:6:2 (N:P:K:Mg:B)	70 gr/planta	al voleo
- agosto	18:5:15:6:2	70 gr/planta	al voleo
- octubre	33N(nutrán)	70 gr/planta	al voleo

Ocasionalmente, el finquero aplica además gallinaza o compost. La forma de aplicación "al voleo" significa que el fertilizante se distribuye desde la mitad de la bandola hacia el pie de las plantas de café. La implementación del programa de fertilización da lugar a una permanente entrada de nutrientes dentro de las parcelas, cuyas cantidades por año y superficie se resumen en el cuadro 3.4.

Cuadro 3.4 Uso de elementos de nutrición vegetal en los sitios estudiados

(no=no utilizado; nd=no determinado)

Sitios	Nutrientes							
	N	P	K	Mg	B	S	Cu	Zn
Café en desarrollo (año 1)								
Finca "Sacramento" (kg/ha/año)	162	60	45	28	nd	no	nd	nd
Eucalipto de 1 año (kg/año)	404	149	113	71	nd	no	nd	nd
Finca "Rosario" (kg/ha/año)	126	47	35	18	4	no	nd	nd
Eucalipto de 4 años (kg/año)	117	43	33	16	4	no	nd	nd
Eucalipto de 5 años (kg/año)	40	15	11	6	1	no	nd	nd
Eucalipto de 6 años (kg/año)	71	26	20	10	2	no	nd	nd
Parcela ICAFE (kg/ha/año)	214	61	55	31	nd	nd	nd	nd
Eucalipto de 7 años (kg/año)	40	12	10	6	nd	nd	nd	nd
Café en producción								
Finca "Rosario" (kg/ha/año)	153	11	55	27	9	100	nd	nd
Eucalipto de 4 años (kg/año)	141	10	51	25	8	92	nd	nd
Eucalipto de 5 años (kg/año)	49	4	18	9	3	32	nd	nd
Eucalipto de 6 años (kg/año)	85	6	31	15	5	56	nd	nd
Parcela ICAFE (kg/ha/año)	268	39	116	47	16	no	no	no
Eucalipto de 7 años (kg/año)	50	7	22	9	3	no	no	no

El eucalipto no se fertiliza, excepto en las tres parcelas de la finca "Rosario" donde después de la siembra durante el primer año se aplicaron 2.5 onzas/árbol de nutrán (33% de N) o nitrosul (33% N + 45% SO₄) al pie de las plantas. No obstante, se supone que las raíces del eucalipto aprovechan parte del fertilizante que se aplica para el café.

Como resultado del relativamente intenso programa de abonamiento mineral y por la forma de aplicación del fertilizante al "voleo", se puede distinguir en las parcelas de la finca "Rosario" e ICAFE una "banda de abonamiento" de 0.90 metros de ancho a ambos lados de las hileras de café y una entrecalle de 1.0 metro donde no se distribuye abono y probablemente tenga una menor influencia de éste. En el caso de la parcela de "Sacramento", por tratarse de una plantación nueva que recibió solamente un ciclo de abonado y con distanciamientos diferentes al resto, se supone que también se irá formando una "banda de abonamiento" pero de dimensiones

menores, lo cual dependerá del tipo de crecimiento de las bandolas de la nueva variedad Costa Rica 95.

Debido a la elevada acidez de los suelos, se suelen aplicar enmiendas periódicas (cada 4-5 años) con cal o dolomita (50% Ca + 50% Mg). El año 1994 se aplicó dolomita en toda la finca "Rosario" a razón de 48 g/planta. No se reportó el uso de enmiendas para los otros sitios.

La incidencia de plagas y enfermedades no constituye un problema en la finca "Rosario", no existiendo necesidad de aplicar pesticidas. Solamente se han aplicado nematicidas e insecticidas durante la etapa de desarrollo del cafetal, más con fines preventivos que curativos. Tampoco se controlan malezas, debido a que con el crecimiento del café el suelo queda totalmente sombreado, inclusive después de la recepa café. En la parcela de ICAFE sí se presentaron algunos problemas como roya y cochinilla, los cuales fueron controlados químicamente. En la parcela de "Sacramento" aún no se presentó ningún problema fitosanitario.

En la finca "Rosario" se aplica el sistema de podas por lotes, la última poda se realizó en febrero/93 en Tronco Planes y en febrero/96 en Corte del Piñal, en ambos casos fueron realizadas podas bajas. En el caso de Lopez Nuevo, por motivos relacionados con los precios del café en el mercado, se practicó una poda baja cada dos calles en febrero/91 y febrero/92, en lugar de la poda por lotes; en febrero/97 se realizó un esqueletamiento en dos calles de esta parcela. En la parcela de ICAFE también se realizó una única poda baja por lote el año 1996.

3.3 ESQUEMA DE MUESTREO

Considerando los objetivos del estudio, se realizaron dos tipos de actividades de muestreo para dos variables diferentes: muestreo de raíces finas y muestreo de raíces leñosas. El muestreo de raíces finas permitió identificar sus patrones de distribución espacial dentro del sistema agroforestal e involucró también a las raíces finas del café, para evaluar la probabilidad de competencia por recursos del suelo. El muestreo de raíces leñosas se realizó con el fin de caracterizar y describir la arquitectura del sistema radical de *Eucalyptus deglupta*.

3.3.1 ESQUEMA DE MUESTREO PARA RAICES FINAS

El muestreo de raíces finas se realizó en tres parcelas de la finca "Rosario" una parcela de la finca "Sacramento", ambas en la localidad de Naranjo y una parcela de la finca de ICAFE en San Pedro de Barva, Heredia. Estas parcelas fueron inventariadas previamente (Anexo B).

Las parcelas elegidas forman una especie de "pseudoserie de tiempo" de árboles de 1, 4, 5, 6 y 7 años de edad en las respectivas parcelas. Dado que suponer una "pseudoserie de tiempo" con árboles pertenecientes a diferentes parcelas implica introducir variabilidad proveniente de factores ambientales y de sitio que no pueden ser controlados, se prefiere utilizar valores promedio de dap dentro del rango máximo y mínimo con 90% de confiabilidad para seleccionar los árboles que serán muestreados dentro de cada parcela, antes que aplicar un modelo de regresión para las tres parcelas; aunque por lo obtenido en el Anexo B, ambos enfoques permiten obtener resultados bastante parecidos.

El supuesto asociado a la decisión de muestrear una variable de crecimiento subterráneo (raíces finas) empleando un parámetro de la parte aérea (dap) es que existe una relación directamente proporcional entre ambas variables.

En la finca "Rosario" se muestrearon tres árboles por cada una de las tres parcelas, sumando nueve árboles en total. Utilizando el mismo enfoque, se muestrearon otros tres árboles de siete años en la finca de ICAFE en Heredia y tres árboles en una parcela de un año de edad en la finca Sacramento de Naranjo. En ambos casos, los datos obtenidos sirvieron para fines de validación de un posible modelo de distribución espacial de raíces finas desarrollado en base a los datos de la finca "Rosario" o para fines de comparación de resultados.

En conclusión, los criterios para el muestreo de árboles dentro de las parcelas fueron los siguientes: (a) que no se encuentren en el borde de la parcela; (b) que tengan un fuste recto y con crecimiento "normal", lo que significa que no sean árboles bifurcados, torcidos en su base, que no hayan sufrido daños en su tronco principal por plagas, enfermedades o efectos mecánicos; (c) que tengan un dap dentro de un rango de confiabilidad del 90% con respecto a la media aritmética estimada para los árboles de la parcela.

Establecidos los criterios para la selección de los árboles, se procedió a definir los puntos de muestreo para cada árbol. El esquema de muestreo de raíces finas a nivel de cada árbol se diseñó adaptando la división de cuadrantes que proponen Van Noordwijk *et al.* (1985) a las distancias existentes entre los árboles y a la cantidad de muestras requeridas. Sin embargo, para una intensidad de muestreo que permita recolectar información válida sobre la distribución espacial de raíces, se tendrían que muestrear 63 puntos por cada árbol dando 945 muestras para todo el estudio, solo para una profundidad, o 4725 muestras para 5 profundidades por cada punto de muestreo, lo cual es muy poco práctico. Para identificar un tamaño óptimo del área de

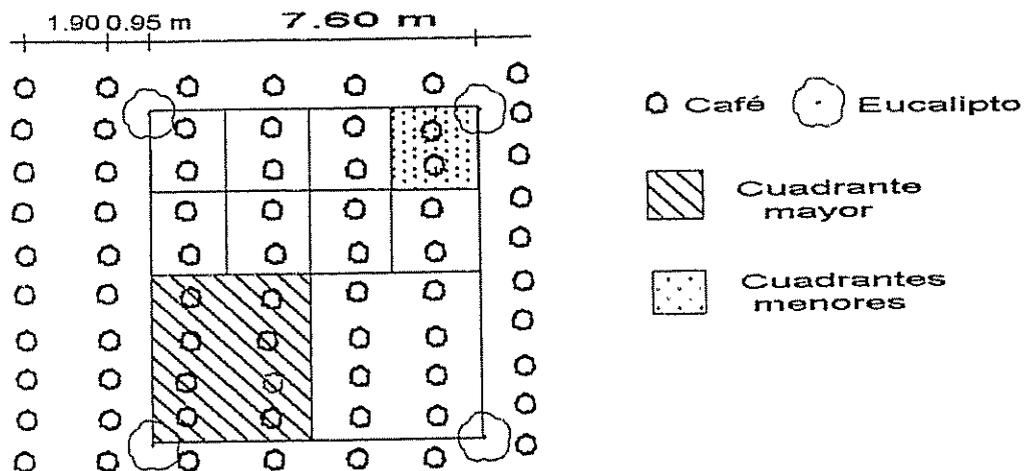
muestreo, se realizó un muestreo exploratorio de escasa densidad, utilizando todo el cuadrante (seis muestras por cuadrante) en la parcela de la finca de ICAFE, para determinar la posibilidad de reducir el tamaño del cuadrante a una magnitud tal que permita obtener una cantidad razonable de muestras por árbol, utilizando a la vez una densidad adecuada de muestreo. Como resultado de lo anterior, se define el “cuadrante menor” como unidad de muestreo, el cual equivale a un cuarto de cuadrante mayor (figura 3.1, a). Se supone que en el cuadrante menor que limita con el árbol de eucalipto, la probabilidad de encontrar raíces finas pertenecientes a otros individuos es sumamente baja y puede despreciarse.

Se tomaron 15 puntos de muestreo dentro de uno de los cuatro cuadrantes menores que son colindantes a un árbol, según el esquema de la figura 3.1, b. Para cada punto de muestreo se tomaron cinco muestras a las siguientes profundidades: 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y 40-60 cm. Por lo tanto, se obtuvieron 1125 muestras de raíces finas, cada una de las cuales fue separada en raíces finas de eucalipto, de café, de otras especies y/o en raíces finas no identificadas.

Por otro lado, se identificaron dos covariables que se supone tienen un papel importante en la producción de raíces finas, estas son el grado de compactación del terreno y la disponibilidad de nutrientes en el sitio, lo cual depende de la fertilidad natural del suelo, la frecuencia, dosis y forma de aplicación de los fertilizantes.

En general, dentro de la parcela existe una “calle”, que es el espacio destinado a la circulación de las personas y el espacio próximo a las plantas de café, que es aporcado periódicamente y que se mantiene menos compactado que la “calle”. Además, el finquero utiliza una forma de aplicación de los fertilizantes localizada al pie de la planta de café; la “calle” no recibe abonamiento, excepto por los pocos gránulos que caen fuera, al ser esparcidos a mano al pie de la planta. Por lo tanto, el esquema de muestreo en cuadrantes menores incorpora puntos de muestreo en sitios donde existe una gradiente de compactación y de accesibilidad a nutrientes minerales (figura 3.1, b).

a) Identificación de cuadrantes “mayores” y “menores” en la plantación



b) Puntos de muestreo en un cuadrante menor

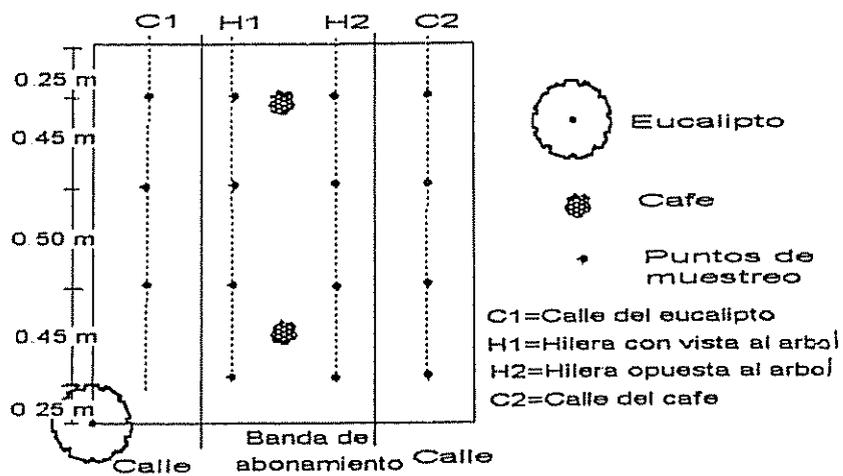


Figura 3.1. Esquemas de muestreo para raíces finas

3.3.2 ESQUEMA DE MUESTREO PARA RAICES LEÑOSAS

Considerando que el muestreo de raíces leñosas es destructivo, el diseño de la muestra depende fuertemente de encontrar sitios donde por alguna circunstancia se estén talando árboles de eucalipto que se encuentran dentro de un sistema agroforestal con café. Por este motivo, se aprovechó la remoción de una plantación de café con árboles de eucalipto, para instalar un nuevo experimento en una parcela experimental de ICAFE en la localidad de Heredia. Los árboles tienen siete años de edad y fueron inventariados previamente (Anexo B); éstos fueron arrancados de la tierra empleando tracción proveniente de maquinaria pesada.

La caracterización de patrones arquitectónicos de *E. deglupta* se realizó mediante la observación y medición de parámetros arquitectónicos específicos en raíces leñosas, asumiendo un enfoque de estudio de caso, debido a la falta de replicación en el estudio. Con este enfoque, se trabajó con raíces de siete árboles (20% del total de árboles en la parcela), procurando escoger aquellos ejemplares que mejor conserven sus características arquitectónicas después de la remoción mecánica. Por otro lado, se tomaron 75 muestras aleatorias de trozos de raíces leñosas de diferentes órdenes (i.e primer, segundo, tercer y cuarto orden) y diferentes árboles, para identificar los patrones de ramificación de la raíz de *E. deglupta*. Estas muestras fueron tomadas (a) de raíces laterales expuestas mediante el corte de trozos escogidos aleatoriamente y (b) de raíces laterales que quedaron todavía en el suelo, los cuales fueron excavados cuidadosamente, sin identificar árboles. Finalmente, se tomaron nueve muestras adicionales de trozos de raíces leñosas laterales para realizar un análisis de fractales de los siguientes sitios: la franja donde se localizó previamente la hilera del eucalipto, en la calle vecina y después de dos calles (figura 3.2). Las dimensiones de estos trozos de raíces fueron de 20 a 25 cm para que pudieran caber en la pantalla del “scanner”.

3.4 MEDICIONES Y ANALISIS

3.4.1 RAICES FINAS

Las muestras de raíces finas fueron tomadas en una ocasión solamente con cilindros de metal afilados de 54 mm de diámetro interior y tres longitudes, según el esquema de muestreo y los rangos de profundidades establecidos.

los diámetros típicos de las especies que se estudien. En un estudio preliminar, se lavaron muestras de suelo conteniendo raíces de café y eucalipto utilizando tamices de 0.25, 0.5, 1, 1.5 y 2 mm de apertura. Se escogió tamices de 1 mm debido a que la ganancia en raíces finas recuperadas con tamices menores a 1 mm de apertura es despreciable, en tanto que el tiempo necesario para lavar una muestra crece con la disminución de la apertura de los tamices. El lavado de las muestras se realizó en instalaciones del CATIE, con abundante agua corriente. No se utilizaron solventes ni ningún otro tipo de sustancias químicas para facilitar la separación de los terrones durante el lavado; pero se encontró que dejar las muestras remojando en agua durante una noche, facilita en gran medida el proceso de lavado de las raíces finas. La separación de material orgánico y raíces se realizó manualmente, con la ayuda de pinzas en medio líquido.

Posteriormente, se procedió a separar las raíces de cada muestra por especies y a almacenarlas en etanol al 15%. Con carácter previo se elaboraron “estándares morfológicos”; es decir, se obtuvieron varias muestras de raíces finas de café y eucalipto de procedencia conocida, para tener una idea visual de las posibles morfologías que pueden presentar las raíces finas de ambas especies (cuadro 3.5).

Cuadro 3.5 Características morfológicas comparativas entre raíces finas de *C. arabica* y

E. deglupta

Características	Raíces de café	Raíces de eucalipto
Color de raíces vivas	Marrón claro, café amarillento	Café oscuro, rojo oscuro a veces casi blancas
Color de raíces muertas	Diversos tonos de café	Diversos tonos de café
Grosor típico	Gruesas	Delgadas o muy delgadas
Consistencia	Blandas, células con abundante citoplasma	Duras, con frecuencia lignificadas
Ramificación	Poco ramificadas	Desde ausencia de ramificación en segmentos largos a abundante ramificación en segmentos cortos

Al momento de realizar el muestreo (entre los meses de mayo y junio), se encontraron junto a las raíces finas vivas algunas raíces finas muertas en diferentes estados de descomposición. Se realizaron varios intentos para tratar de separar raíces vivas y muertas, pero no se consiguió establecer algún procedimiento claro, exacto o suficientemente rápido para realizarlo en la práctica, por lo que no se hizo este tipo de separación. Cuando existió duda sobre la especie, café o eucalipto, a la que pertenecerían algunas raíces en un estado de descomposición tal que habían perdido ya los tejidos peridérmicos o el cortex primario, se procedió de la siguiente manera: (a) se realizó la separación de las raíces que sí pudieron ser identificadas en un grupo para el eucalipto y otro grupo para el café, (b) se colocó la muestra de raíces sin identificar en un tercer grupo, (c) al momento de conocer la densidad de longitud de raíces (cm/cm^3), se distribuyó el tercer grupo entre los dos primeros, de acuerdo a sus proporciones, es decir:

$$P_c = \frac{L_{rc1}}{(L_{rc1} + L_{re1})}; \quad P_e = \frac{L_{re1}}{(L_{rc1} + L_{re1})}$$

$$L_{rc2} = L_{rc1} + P_c \times L_{rd1}; \quad L_{re2} = L_{re1} + P_e \times L_{rd1}$$

Donde: P_c , P_e son las proporciones de raíces de café y eucalipto en los primeros dos grupos; L_{rc1} , L_{re1} y L_{rd1} son las densidades de raíces en longitud para café, eucalipto y grupo no identificado respectivamente, y L_{rc2} y L_{re2} son las densidades de raíces en longitud corregidas para café y eucalipto respectivamente. En el caso de la parcela de eucalipto de un año, además de raíces de café y eucalipto, se encontraron raíces de otras especies, i.e. yerbas y malezas, las cuales pasaron a formar un cuarto grupo de raíces.

Una vez concluida la fase de separación de raíces por especies, se procedió a "scanear" las muestras utilizando bandejas de vidrio de diferentes tamaños y de 1 cm. de alto. En estas bandejas fueron distribuidas las muestras de raíces de manera aleatoria, evitando en lo posible la sobreposición de raíces o traslapes; debido a que éstos introducen un sesgo en la estimación de la longitud de raíces, disminuyendo su magnitud. Como medio líquido se utilizó etanol al 15% para evitar la formación de sombras o distorsiones en las muestras al momento de "scanearlas". El scanner fue calibrado para que la corrección de tono diera un contraste pronunciado entre las

raíces y el fondo. Nuevamente, se obtuvieron imágenes digitales de las muestras, las cuales fueron procesadas en dos pasos: (a) una preparación de las imágenes a un formato conveniente, y (b) la estimación de la densidad de longitud de raíces mediante el uso de un programa escrito para el efecto. La preparación de las imágenes se realizó utilizando las herramientas del software IDRISI for Windows, Versión 1.0.003, específicamente, el comando RECLASS para transformar las tonalidades de gris en las imágenes originales a sólo dos tonalidades, asignándoles un valor de uno a los píxeles oscuros que representan raíces y un valor de cero a los píxeles que representan el fondo claro de la imagen. Luego, se utilizó el comando CONVERT para transformar el formato binario de las imágenes a formato ASCII. En formato ASCII, cada imagen está representada por una columna de ceros y unos.

El cálculo de la densidad de longitud de raíces se realizó mediante un programa BASIC que se lista en el Anexo D. Este programa utiliza el método de conteo de intercepciones según el método de Newman (1966) y lo transforma a densidad de raíces finas en longitud. El usuario puede elegir la opción de separar de tres a seis clases diamétricas de raíces finas, los resultados del programa son almacenados en un archivo que puede ser leído por cualquier hoja de cálculo. A partir de los valores obtenidos para la distribución de clases diamétricas, se pueden estimar el volumen y la superficie de absorción de las raíces finas. El programa fue validado mediante la estimación de la densidad de longitud de raíces tanto de manera manual como con el uso del programa, encontrándose que no existen diferencias entre ambos métodos para ocho muestras, el cuadro 3.6 muestra los resultados de dicho análisis de validación.

Los valores de densidad de longitud de raíces obtenidos para las muestras fueron analizados de la siguiente manera:

(a) Una prueba de estadísticas descriptivas y de normalidad para ver el tipo de distribución de los datos, tanto de manera global como por puntos de muestreo y parcelas. En vista de que los datos presentan una fuerte asimetría hacia la derecha, se decidió utilizar pruebas estadísticas no paramétricas. Se probó, pero no se realizó ninguna transformación de los datos originales.

(b) Pruebas de correlación entre especies tomando los datos en conjunto y agrupándolos según categorías de profundidad y ubicación espacial. En todos los casos solamente se empleó el coeficiente de correlación Tau de Kendall.

Cuadro 3.6 Resultados de validación del programa BASIC para el cálculo de densidad de longitud de raíces

Longitud de raíces (mm) en muestras estimada por:		Diferencias
Programa	Manual	
594.49	679.37	-84.88
387.01	424.12	-37.11
1324.63	1303.76	20.87
426.91	455.53	-28.62
95.76	109.96	-14.20
95.76	90.32	5.44
107.73	113.88	-6.15
67.83	62.83	5.00
Numero de observaciones		8
Media de datos apareados		-17.46
t		-1.49
Prob> t		0.18

(c) Pruebas de comparación de distribuciones mediante el empleo de la prueba de Kruskal-Wallis y comparaciones múltiples de rangos (Conover, 1980), para las siguientes categorías de datos: (a) edades, (b) puntos de muestreo (c) ubicación espacial de las muestras, en bandas de abonamiento o calles y (d) ubicación de los puntos de muestreo en bandas de abonamiento opuestas a la calle del eucalipto (H2), bandas con vista al eucalipto (H1), calle del eucalipto (C1) y calle del café una fila después del eucalipto (C2), como se muestra en la figura 3.1.

Posteriormente, se realizó un análisis espacial de los datos empleando la técnica de interpolación espacial y obtención de curvas de nivel por categorías de DLR (densidad de longitud de raíces). Se utilizó el software SURFER for Windows, el cual elabora este tipo de matrices espaciales de datos a partir de algunos puntos de magnitud conocida. Dado que la cantidad de puntos de muestreo es tan pequeña que impide utilizar técnicas geoestadísticas, no se estimaron parámetros como la medida espacial de variación de los datos (semivariograma), el efecto “nugget”, ni se ajustaron los datos a alguno de los modelos espaciales disponibles. No obstante, el “kriging” es un método de interpolación de datos espaciales muy flexible; puede ser utilizado sin especificar un modelo de variograma; es decir sin especificar una medida de la variabilidad de los datos. En este caso, los mapas resultantes no sirven para realizar inferencias

estadísticas pero si permiten analizar cualitativamente algunas tendencias en la variación de los datos. Se utilizaron rejillas de 400 puntos en mapas que representan el área muestreada de los cuadrantes menores. Los datos representados en estos mapas fueron los promedios de DLR para tres árboles correspondientes a una parcela (una categoría de edad).

Posteriormente, se transformaron los datos sobre densidades de raíces en longitud a un parámetro propuesto por Gillespie (1989) denominado distancia media entre raíces para plantaciones agroforestales que involucran las raíces de una especie arbórea y de un cultivo:

$$r = \frac{1}{\sqrt{\pi \times L_v}}$$

Donde: L_v es la densidad de longitud de raíces, para la suma de los datos de densidad de longitud de raíces del café y del eucalipto (densidad aditiva). Para cada categoría de edad, se elaboró un mapa de los valores de "r". Se intentó interpolar estos datos en base al método de "kriging" con la intención de establecer las áreas donde los valores de "r" son menores o iguales a valores límites que pueden fluctuar entre 0.25 y 0.18¹, en el supuesto de que en estas áreas existe competencia de raíces por nitratos y posiblemente también por potasio, no obstante, en ninguno de los casos los valores obtenidos sobrepasaron los umbrales propuestos por Gillespie. Por este motivo, se elaboraron mapas con rangos de "r", en el sentido de que aquellas áreas con rangos cercanos a los valores límite serán consideradas como áreas de probable competencia radicular. Nuevamente, la falta de rigor estadístico para el uso de estos mapas limita su interpretación a relaciones meramente cualitativas. Finalmente, se analizó la distribución de frecuencias de raíces finas de eucalipto y café.

3.4.2 RAICES LEÑOSAS

Se realizaron tres tipos de actividades para el estudio de las raíces leñosas: (a) observaciones y mediciones directas en las partes de los sistemas radiculares de siete árboles que no sufrieron daños marcados con la extracción mecánica, con el objetivo de caracterizar la

¹ Estos valores son presentados por Gillespie (1989) para evaluar la competencia potencial por nutrientes en sistemas agroforestales: al combinar árboles con cultivos Gillespie supone que existirá competencia de raíces a partir de esos valores. Por lo tanto, estos datos se tienen que considerar con precaución y como una primera aproximación, se asume que investigaciones posteriores en sistemas café-eucalipto, permitirán conocer con mayor precisión estos intervalos

arquitectura global de la raíz del eucalipto, obtener estadísticas descriptivas y probar si existe alguna relación entre el diámetro del cuello de la raíz, es decir el diámetro del vástago a 10-25 cm por debajo del nivel del suelo, y las dimensiones de sus ramificaciones, para lo que se midieron 37 raíces secundarias laterales y 21 raíces pivotantes; (b) un estudio topológico en base a mediciones manuales de 75 muestras (trozos) de raíces leñosas de primer, segundo, tercer y cuarto orden recolectadas aleatoriamente, y (c) un análisis de fractales en base a mediciones computarizadas provenientes de nueve muestras (trozos) de raíces excavados en los sitios descritos en el diseño de la muestra (figura 3.2).

Los dos tipos de análisis utilizados: el análisis de fractales y el análisis topológico no son frecuentemente empleados debido a que la base teórica que los sustenta es de relativamente reciente desarrollo y los aspectos metodológicos asociados a estos tipos de análisis todavía no son conocidos de manera amplia. No obstante, estos métodos poseen un gran potencial como herramientas para describir y analizar la “complejidad” y la “irregularidad” de sistemas ramificados, tales como las raíces. El desarrollo de estas nuevas áreas de las matemáticas tiene relación con las limitaciones de la geometría euclideana para describir formas biológicas complejas y discontinuas (Lorimer *et al.*, 1994). Por este motivo, gran parte de la metodología empleada tuvo que ser desarrollada específicamente para ser aplicada al presente trabajo. El análisis de fractales se examina en el Anexo E.

3.4.2.1 ANALISIS TOPOLOGICO

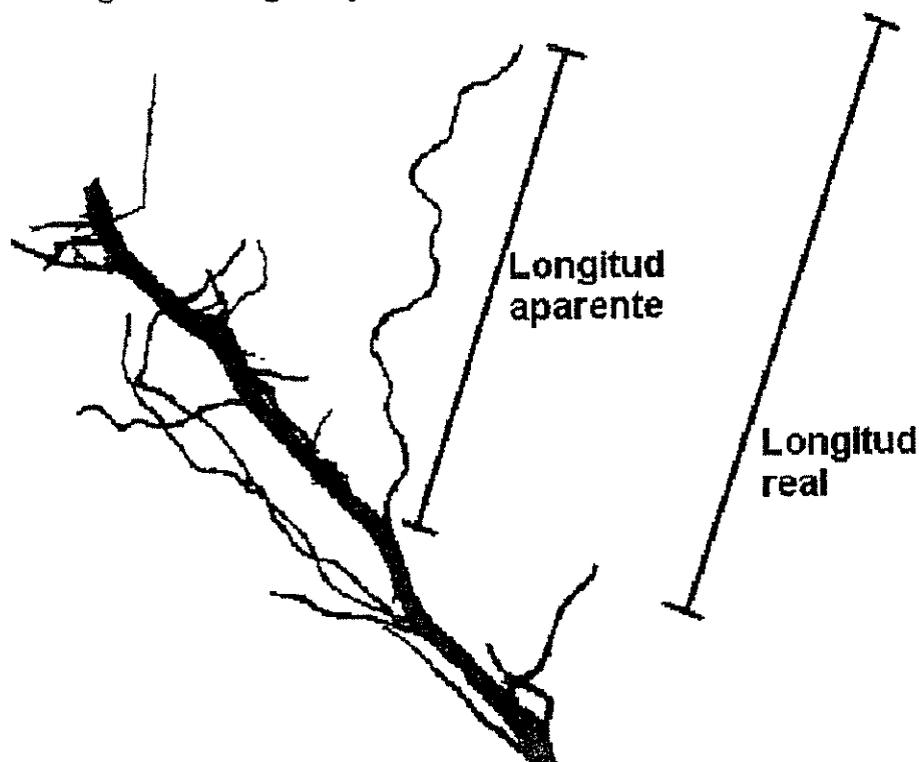
El objetivo del análisis topológico utilizado en este estudio fue de predecir la longitud total de la raíz a través de la identificación de sus patrones de ramificación y la estimación de dos coeficientes de proporcionalidad, alfa y “q”, entre las dimensiones de raíces antes y después de cada evento de ramificación y la asignación diametral después del evento de ramificación. La metodología a aplicar fue propuesta por Van Noordwijk *et al.* (1994) y Spek y Van Noordwijk (1994); un ejemplo de su aplicación se muestra en Van Noordwijk y Purnomosidhi (1995).

Para realizar este análisis, fueron medidas en 75 muestras aleatorias de raíces leñosas (a) las longitudes de segmentos de raíces entre dos eventos de ramificación y (b) los diámetros de raíces antes y después de la ramificación. Por cada una de las 75 muestras fueron tomadas de 6 a 14 registros, originando una base de datos con 792 registros. Las longitudes de los segmentos se midieron considerando una longitud aparente y una longitud real, es decir la longitud que tendría la raíz si ésta pudiera ser extendida (figura 3.3); la longitud aparente se midió con reglas

de madera, mientras que la longitud real se midió siguiendo el recorrido real de la raíz con una cinta flexible de plástico y con el uso de mecatres en el caso de raíces pequeñas.

Se realizó un análisis exploratorio de los datos para identificar algunas tendencias entre las mediciones de longitud y diámetros con respecto al orden de ramificación. Para esto, se realizaron análisis de varianza, con el procedimiento GLM del SAS, el cual permite realizar este análisis para variables con distintos números de observaciones (diseños desbalanceados). También se utilizó la prueba de comparación múltiple de medias de Duncan del SAS, el cual calcula la media armónica de las distintas cantidades de observaciones para corregir el problema del diseño desbalanceado. Posteriormente, se calculó la razón entre longitud aparente y longitud real, la cual se conoce como factor de “enrollamiento” (Dhyani *et al.*, 1996).

Figura 3.3. Longitud aparente y longitud real de una raíz leñosa



Se midieron los diámetros de los segmentos de la raíz antes y después de cada evento de ramificación, con la ayuda de un calibrador con resolución de décimas de milímetros. Los datos de diámetros se utilizaron en la estimación del parámetro de proporcionalidad alfa en base a la siguiente fórmula:

$$\alpha = \frac{D_i^2}{\sum_{j=1}^k D_j^2}$$

Donde: D_i es el diámetro de la raíz antes de la ramificación y D_j son los diámetros de las raíces resultantes después de la ramificación. Se supone que en una distribución perfecta de los diámetros anterior y posteriores al evento de ramificación, α será igual a 1, en la práctica este parámetro tendrá un valor diferente de uno, de acuerdo a la información genética de la especie y las modificaciones impuestas por el ambiente al crecimiento de la raíz.

También se calculó un parámetro de reparto o asignación q , por medio de la fórmula:

$$q = \frac{\max(D_j^2)}{\sum_{j=1}^k D_j^2}$$

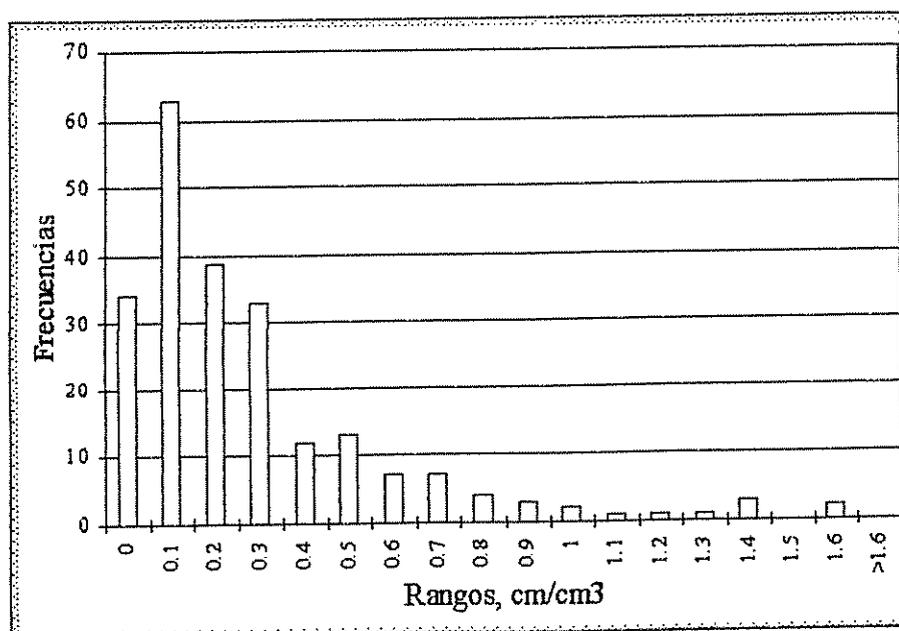
El principal supuesto de un modelo de "fractales" es que las mismas reglas de ramificación tienen lugar en todos los niveles u ordenes de ramificación. Esto implica que el parámetro alfa debería ser independiente de los ordenes de ramificación y tamaños de la raíz. Para verificarlo, se analizaron las distribuciones de frecuencia de ambos parámetros, se probó la hipótesis de que las medias son independientes del orden de ramificación y se exploraron las relaciones entre los datos de diámetro anterior con los valores de alfa, q y longitudes. Se calcularon los coeficientes de correlación entre variables, con el PROC CORR del SAS y se corrieron regresiones y análisis de covarianza con el PROC GLM del SAS. Finalmente, se desarrolló un modelo de simulación para predecir el crecimiento de las raíces laterales en extensión, utilizando los valores promedio encontrados.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 DISTRIBUCION ESPACIAL DE RAICES FINAS DE EUCALIPTO

El análisis univariado y la prueba de normalidad de los datos sobre raíces finas, dio como resultado distribuciones de frecuencia asimétricas hacia la derecha, tanto para las raíces del eucalipto como las del café, lo cual indica que existen algunos pocos valores de DLR (DLR) mucho más altos que el resto de los datos (figura 4.1). Heeraman y Juma (1993) reportaron asimetría y falta de normalidad para datos de raíces finas de *Vicia faba* L.; ellos realizaron una transformación de sus datos para establecer homogeneidad de varianza utilizando el procedimiento Box-Cox. No obstante, el uso de métodos no paramétricos ha sido considerado en varias oportunidades como una alternativa más "robusta" y confiable que la transformación de datos (Conover, 1980; Helsel y Hirsch, 1992; Infante y Zárate, 1997). El mayor problema que se identificó para los datos en este trabajo al momento de intentar transformarlos, fue que para cualquier tipo de transformación siempre existían grupos de datos independientes que sí se ajustaban bien a la transformación, mientras que otros no se ajustaban. Frecuentemente, después

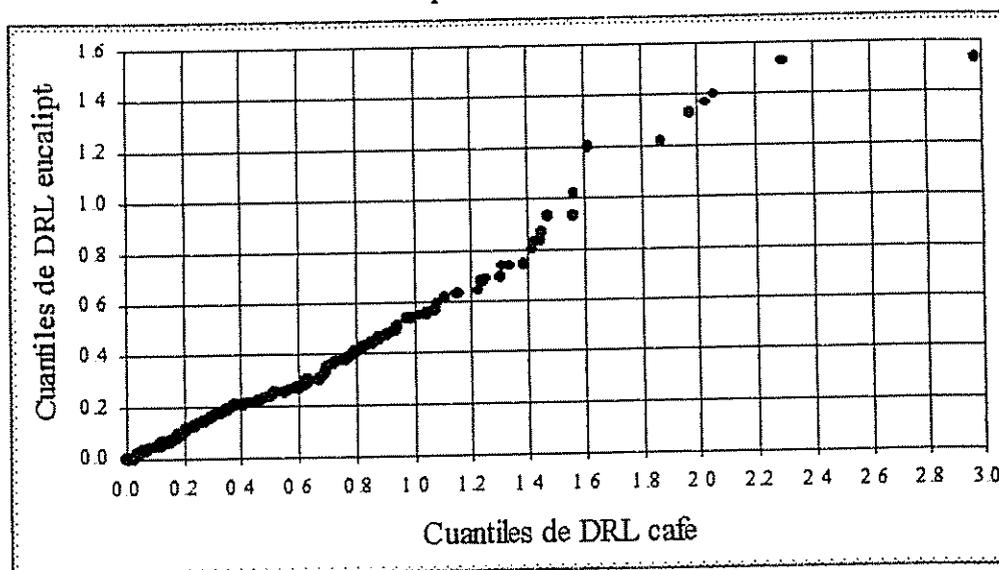
Figura 4.1 Distribución de frecuencias de DLR de eucalipto para el estrato de 0 a 10 cm de profundidad



de una transformación solo una parte de los datos podía considerarse como proveniente de una distribución normal, los demás datos presentaban asimetrías hacia la derecha o hacia la izquierda. Debido a estos problemas, se optó por el uso de pruebas no paramétricas para el análisis de datos de raíces finas.

Sabiendo que los datos de DLR no son normales, interesa conocer si los datos de eucalipto y café pertenecen a una misma distribución. La figura 4.2 muestra una tendencia lineal simétrica de los cuantiles de ambas especies en un gráfico cuantil-cuantil (Q-Q), para todos los datos correspondientes al estrato de profundidad de 0-10 cm. La magnitud de la densidad raíces de café (x) aproximadamente duplica a la magnitud correspondiente del eucalipto (y); la mayor parte de los datos tiene una relación multiplicativa de $y \approx 0.59x$. Aproximadamente un 5% de los datos superiores tiende a cambiar esta relación en forma de un ligero incremento de la tasa de cambio de DLR de eucalipto con respecto a la tasa de cambio del café, lo cual se explica por la mayor asimetría de los datos del eucalipto con respecto al café.

Figura 4.2 Gráfico Q-Q entre DLR de eucalipto y DLR de café, para el estrato 0-10 cm de profundidad



Este tipo de relación entre la distribución de raíces finas de ambas especies tiene implicaciones no solamente estadísticas, sino también biológicas. Globalmente, se ve que la

distribución de raíces finas del café es similar a la distribución de raíces finas del eucalipto a pesar de que en el área de muestreo se encuentran casi completamente las raíces finas de dos "plantas" de café y solamente una parte de las raíces finas de una planta de eucalipto (cuadrante "menor", figura 3.1). Esta tendencia es independiente de la edad del eucalipto o de la plantación de café, en las condiciones en que se tomaron los datos.

La existencia de valores extremos a la derecha de las distribuciones de raíces finas del café y el eucalipto muestra una característica biológica muy importante, que consiste en que dentro de un volumen de suelo determinado, puede ocurrir bajo circunstancias favorables una gran producción de raíces finas. Esto no depende de las características del sitio o parcela, sino de las micro-condiciones existentes dentro del volumen de suelo del que se obtuvo la muestra. La alta producción de raíces finas bajo ciertas circunstancias podría ser una estrategia de los sistemas radicales para aprovechar ciertas ventajas dentro de su nicho ecológico.

El análisis bivariado muestra correlaciones significativas entre los datos de ambas especies para los datos globales y los estratos de profundidad de 0-10 y 10-20 cm. No hay ninguna tendencia consistente en los demás datos de correlación (cuadro 4.1). Los coeficientes de correlación por si solos no explican la presencia o ausencia de relaciones de competencia entre raíces finas de café y eucalipto, no obstante, permiten tener una primera aproximación a esta problemática. Para los datos de raíces finas tomados globalmente (todas las muestras), se constata la existencia de correlaciones significativas positivas en los dos primeros estratos de profundidad. Es decir, las muestras tomadas en los primeros 20 cm de profundidad muestran cierta tendencia a que una mayor densidad de raíces finas de café en el volumen de suelo muestreado, esté asociada a una mayor densidad de raíces finas de eucalipto y viceversa, aunque esta tendencia es muy débil (con coeficientes de 0.14-0.15).

Un valor de DLR alto implica una mayor exploración y explotación de recursos del suelo, lo cual puede ser una ventaja comparativa para las raíces finas de una especie con respecto a la otra, en especial si en el volumen de suelo explorado existe alguna limitación de nutrientes o agua. Es posible asociar el concepto de mayor capacidad competitiva interespecífica a valores altos de raíces finas de una especie, aunque ello puede significar también alta competencia intraespecífica. Por su parte, un valor bajo de DLR implica menores posibilidades de competencia por recursos, una menor capacidad competitiva interespecífica. John *et al.* (1983) indican que una mayor DLR en un micrositio determinado constituye una ventaja cuando la

Cuadro 4.1 Coeficientes de correlación Tau de Kendall entre datos de raíces finas de café y eucalipto, considerando la edad del eucalipto y diferencias de sitio en las parcelas

Profund.	Global			Euc. 1 año			Euc. 4 años			Euc 5 años			Euc. 6 años			Euc. 7 años		
	Parcela	B. ab.	Calle	Parcela	B. ab.	Calle	Parcela	B. ab.	Calle	Parcela	B. ab.	Calle	Parcela	B. ab.	Calle	Parcela	B. ab.	Calle
N=	225	120	105	45	24	21	45	24	21	45	24	21	45	24	21	45	24	21
0-10 cm	0.140	0.119	0.175	-0.240	-0.316	-0.043	-0.117	-0.087	-0.205	-0.286	-0.352	-0.282	-0.269	-0.359	-0.076	0.083	0.062	0.019
	0.002	0.059	0.009	0.047	0.069	0.811	0.260	0.551	0.194	0.006	0.016	0.075	0.009	0.014	0.629	0.422	0.673	0.904
10-20 cm	0.148	0.162	0.138	0.124	0.329	-0.033	0.157	0.279	0.014	0.008	-0.113	-0.029	0.019	-0.186	0.383	0.057	0.200	-0.141
	0.001	0.010	0.041	0.304	0.049	0.858	0.129	0.056	0.928	0.938	0.441	0.856	0.853	0.205	0.016	0.589	0.178	0.379
20-30 cm	0.069	0.066	0.076	-0.154	-0.455	0.066	-0.016	-0.051	-0.005	-0.022	-0.073	-0.039	0.015	-0.030	0.068	0.238	0.249	0.227
	0.143	0.308	0.271	0.206	0.008	0.721	0.876	0.728	0.976	0.837	0.619	0.808	0.883	0.842	0.671	0.028	0.100	0.174
30-40 cm	0.076	0.053	0.109	-0.046	-0.119	0.041	-0.049	0.036	-0.149	0.032	0.004	0.038	0.140	0.176	0.072	0.145	-0.021	0.304
	0.103	0.410	0.114	0.708	0.486	0.824	0.638	0.804	0.348	0.761	0.980	0.809	0.182	0.240	0.650	0.189	0.892	0.066
40-60 cm	0.040	0.105	-0.025	-0.142	0.009	-0.381	-0.037	0.047	-0.124	0.135	0.374	-0.135	-0.123	-0.119	-0.142	0.137	0.179	0.168
	0.398	0.109	0.725	0.254	0.958	0.041	0.725	0.747	0.432	0.196	0.011	0.397	0.259	0.432	0.394	0.226	0.271	0.320

Números superiores en cada cuadro = coeficientes Kendall Tau-b; números inferiores = $\text{Prob} > |R|$ bajo $H_0: \text{Rho} = 0$

absorción de iones está limitada, ya sea, por la tasa de difusión de los nutrientes o por competencia con otros organismos.

Los coeficientes de correlación Tau-b de Kendall para densidad de longitud de raíces finas de las dos especies, indican un predominio de variación concordante sobre la variación discordante si los coeficientes son positivos y un predominio de la variación discordante sobre la variación concordante si los coeficientes son negativos, en observaciones pareadas y ordenadas por orden de rango de una de las variables (SAS Institute, 1985). Esto significa que si la respuesta en crecimiento de raíces finas a las microcondiciones del suelo (volumen de suelo muestreado) tiende a tener más veces la misma dirección que direcciones opuestas, se obtendrá un coeficiente de correlación positivo y viceversa. Para analizar la capacidad competitiva de las raíces finas, valores positivos del coeficiente Tau-b de Kendal indicarán un mantenimiento de la capacidad competitiva de ambas especies ante microcondiciones variables del suelo, mientras que coeficientes negativos señalarán una respuesta diferente de las raíces finas de una especie con respecto a la otra. Estos coeficientes no informan nada sobre cuál de las especies predomina sobre la otra cuando adquieren valores negativos, sólo indican un predominio de variación discordante.

El mantenimiento de la capacidad competitiva de las raíces finas de café y eucalipto que se observa para los datos globales, en realidad enmascara variaciones discordantes cuando se analizan por categorías de edad del eucalipto (cuadro 4.1). Las parcelas con eucalipto de uno, cinco y seis años presentan coeficientes significativos en el estrato superficial de 0 a 10 cm de profundidad. En estos tres casos, se constata que una de las dos especies tiende a aumentar su capacidad competitiva mientras que la otra la disminuye, con coeficientes que fluctúan de -0.24 a -0.29. Ello no implica que necesariamente ya exista competencia, sino simplemente que las raíces finas de una de las dos especies en cada caso tienden a ser más abundantes y, por lo tanto, esa especie tiene mayores chances para competir exitosamente que la otra especie con menor cantidad de raíces. Además, dado que el valor del coeficiente global para este estrato es positivo, la especie con mayor capacidad competitiva no necesariamente es la misma en las diferentes categorías de edades de eucalipto.

Las diferencias de ambiente a nivel global solo se perciben en los dos primeros estratos de profundidad. El patrón de cambio en los coeficientes de correlación para estos estratos,

indica que en el estrato superficial (0-10 cm), la variación concordante de las raíces finas es ligeramente menor en la banda de abonamiento que en la calle de la plantación, mientras que en el estrato subsuperficial (10-20 cm) el patrón es opuesto. Por debajo de estos dos estratos de profundidad no se encuentran correlaciones significativas, salvo algunas excepciones que pueden atribuirse a circunstancias casuales.

Bajo las condiciones de este estudio, se ve que solamente son interesantes el estrato superficial (0-10 cm) y el estrato subsuperficial (10-20 cm) por las relaciones entre raíces finas del café y el eucalipto dentro de un sistema agroforestal simultáneo. Por debajo de estos estratos, prácticamente no se establecen relaciones entre raíces finas de cultivo y árbol. Las raíces laterales del eucalipto como portadoras de raíces finas, exploran el terreno casi siempre superficialmente, relacionándose con las raíces finas del café solamente en los estratos superficiales (cuadro 4.2).

Las raíces finas del café en general aumentaron su densidad de manera directamente proporcional a la edad del eucalipto en una relación aparentemente no lineal (figura 4.3). El crecimiento de raíces finas es mayor en el estrato superior y va decreciendo con el incremento de profundidad, lo cual concuerda con lo encontrado anteriormente para el café (p. e. Bermudez, 1954; Cuenca *et al.*, 1983; Franco e Infortazo, 1946).

Con referencia a las raíces finas del eucalipto, se nota una tendencia de crecimiento hasta los 6 años para los estratos superficial (0-10 cm) y subsuperficial (10-20 cm) y hasta los 5 años para estratos de profundidad inferiores (figura 4.4).

Considerando que el área de muestreo (cuadrante menor), ocupa un cuadrado de 3.61 m cuadrados, con 1,90 m de lado y una distancia diagonal máxima de 2.69 m, es posible que la exploración del suelo y crecimiento de las raíces finas del eucalipto llegue a un máximo hasta los 5 o 6 años de edad en este área de suelo y que progresivamente vayan explorando y colonizando otros espacios en sitios cada vez más apartados del eje del árbol. Como consecuencia del desplazamiento del "centro de absorción" de nutrientes a otros sitios, posiblemente el árbol ya no esté invirtiendo carbono para la formación de nuevas raíces finas en el espacio comprendido por el área de muestreo. Esta sería una de las posibles explicaciones del hecho de que en la parcela de 7 años exista una densidad de raíces finas menor que en otras parcelas con eucalipto de menor edad.

Figura 4.3 Densidad de longitud de raíces del café para parcelas con diferentes edades de eucalipto y varias profundidades (Medianas, N=45)

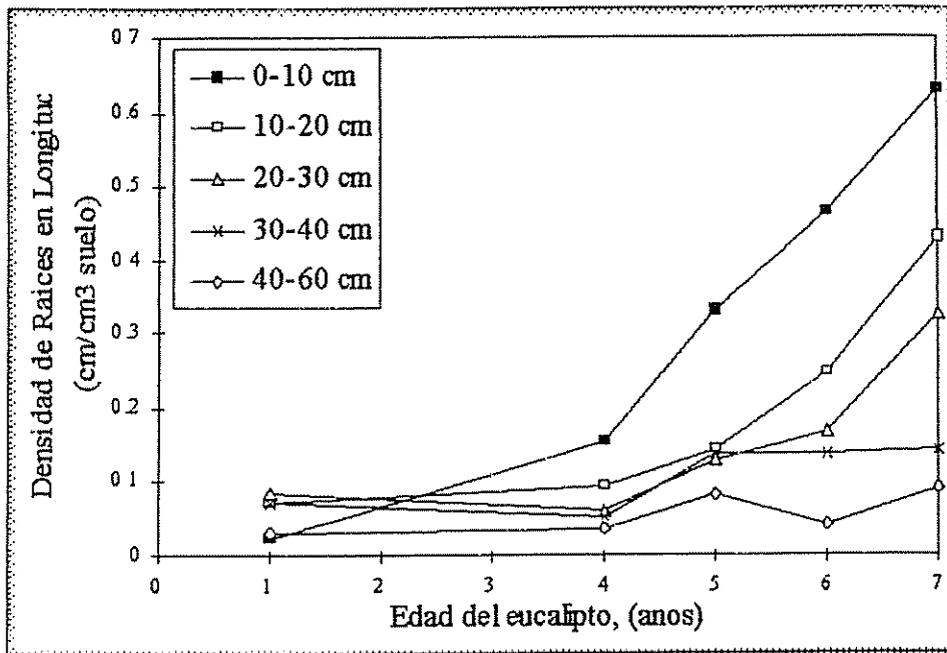
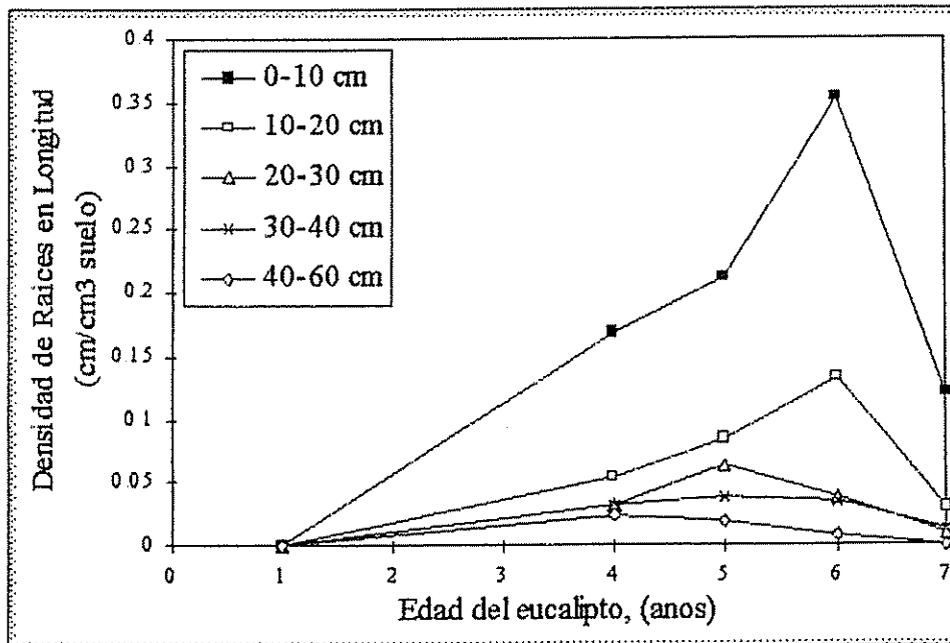


Figura 4.4 Densidad de longitud de raíces del eucalipto para parcelas con diferentes edades de eucalipto y varias profundidades (Medianas, N=45)



Cuadro 4.2 Densidad de Longitud de Raíces (cm/ cm³ de suelo) de café y eucalipto para parcelas con diferentes edades de eucalipto y varias profundidades (Medianas, N=45)

Especie	Profundidad (cm)	Edad del eucalipto en la parcela				
		1 año	4 años	5 años	6 años	7 años
Café	0-10	0.023	0.153	0.331	0.466	0.630
	10-20	0.072	0.094	0.141	0.246	0.429
	20-30	0.085	0.060	0.129	0.166	0.326
	30-40	0.072	0.051	0.138	0.138	0.143
	40-60	0.031	0.037	0.081	0.041	0.089
Eucalipto	0-10	0.000	0.169	0.211	0.352	0.120
	10-20	0.000	0.054	0.084	0.133	0.030
	20-30	0.000	0.031	0.063	0.038	0.009
	30-40	0.000	0.031	0.038	0.035	0.012
	40-60	0.000	0.024	0.018	0.008	0.000

A pesar de estar considerando una “pseudo serie de tiempo” con parcelas de eucalipto de diferentes edades creciendo en condiciones diferentes, que podrían dar lugar a pensar en que este patrón es producto de diferencias de sitio, la hipótesis de un “centro de absorción” que se desplaza alejándose del árbol se ve favorecida por dos hechos: (a) El crecimiento de la parte aérea sigue un patrón bien definido que fue modelado en términos de dap y altura (anexo B), el eucalipto de 7 años tenía un crecimiento mayor en su parte aérea que el eucalipto de edades menores, si los resultados de numerosas investigaciones sobre relaciones alométricas entre la parte subterránea y aérea (Ashton, 1975; Awe *et al.*, 1976; Dhyani *et al.*, 1990) y sobre el modelo del “pipe stem” (Carlson y Harrington, 1987) son válidos también para *E. deglupta*, entonces se debería esperar una mayor densidad de raíces finas para el estos árboles bien desarrollados de eucalipto de 7 años; si en el área del cuadrante menor muestreado no se encontró la densidad de raíces finas esperada, entonces la única explicación es que éstas deben estar creciendo en otro sitio. (b) La figura 4.4 y el cuadro 4.2 muestran la tendencia de disminución de la densidad de raíces finas también en la parcela de seis años para estratos de profundidad por debajo de los 20 cm. Considerando que la parcela con eucalipto de 6 años se

encuentra en la finca "Rosario" en condiciones muy similares de suelo y ambiente con respecto a las parcelas con eucalipto de 4 y 5 años, es muy poco probable que la aparición de este patrón de crecimiento se deba a factores aleatorios. Más aún, en el cuadro 4.2 se observa que las densidades de raíces de eucalipto alcanzan un máximo o "punto de giro" (del inglés turning point) para todos los estratos de profundidad. A medida que aumenta la profundidad, el "punto de giro" tiende a ocurrir en parcelas con eucalipto de menor edad. Aparentemente, dentro del cuadrante menor muestreado, se podría construir una curva de crecimiento de raíces finas de eucalipto que se ajustaría muy bien al modelo de ecuación logística empleada normalmente en ecología y demografía para describir el crecimiento de poblaciones sujeto a ciertas restricciones. Como consecuencia, se podría investigar la competencia interespecífica en términos de las ecuaciones de Lotka-Volterra (Vandermeer, 1981), con la condición de realizar observaciones adicionales de plantaciones puras de eucalipto y de café.

La distribución espacial de raíces finas presenta una mayor complejidad que el patrón "temporal" con relación al eucalipto. Al comparar calle con banda de abonamiento (figura 3.1), solamente se encontraron diferencias significativas para el caso de las raíces finas del café de 1 y 5 años en el estrato de 10-20 cm de profundidad. La desagregación de calles en calle del eucalipto y calle del café (C1 y C2 en figura 3.1) y banda de abonamiento con vista al eucalipto y banda de abonamiento opuesta al eucalipto (H1 y H2 en figura 3.1) permitió identificar diferencias significativas para la densidad de raíces finas del café y eucalipto de 1 y 5 años en el estrato de 10-20 cm de profundidad, también se identificaron otras diferencias significativas para las raíces finas de eucalipto de 1 año en el estrato de 20-30 cm de profundidad, y para las raíces finas del café de 1 y 4 años en los estratos de 30-40 cm y 40-60 cm de profundidad respectivamente. Por lo tanto, se concluye que los diferentes "ambientes" dentro del cuadrante menor no influyen en la distribución espacial de las raíces finas del eucalipto y del café.

Finalmente, la corrida de la prueba Kruskal-Wallis para comparar entre si 15 puntos de muestreo individuales (cada uno con solamente tres repeticiones) dió diferencias significativas entre distribuciones de puntos solamente para 5 de 50 casos posibles, es decir 5 rangos de edad de eucalipto x 5 rangos de profundidad x 2 especies (cuadro 4.3)

Cuadro 4.3 Comparación de densidad de longitud de raíces según especies y profundidades

(N=45; * = prob> χ^2 menor de 10%; +=prob> χ^2 menor de 20%)

Especie	Profundidad (cm)	Edad del eucalipto en la parcela				
		1 año	4 años	5 años	6 años	7 años
Café	0-10	ns	*	ns	ns	ns
	10-20	ns	ns	*	*	ns
	20-30	+	ns	ns	ns	ns
	30-40	*	ns	ns	ns	ns
	40-60	ns	ns	ns	ns	ns
Eucalipto	0-10	+	ns	ns	ns	ns
	10-20	*	ns	+	ns	ns
	20-30	+	ns	ns	ns	ns
	30-40	ns	ns	ns	ns	ns
	40-60	+	ns	ns	ns	ns

No se pueden identificar relaciones o patrones claros para la distribución espacial de las raíces finas del eucalipto, ya que éstas crecen igual independientemente de que se encuentren en la “banda de abonamiento” o en la entrecalle. Esto puede estar indicando que las raíces finas del eucalipto presentan la estrategia de desarrollarse uniformemente en el terreno con el objeto de aprovechar cualquier fuente de nutrientes disponible en un rango de ambientes espaciales. No obstante, las raíces leñosas laterales del eucalipto que son las que en su mayor parte participan en la nutrición de la planta al portar la mayor cantidad de raíces finas, podrían explorar el terreno de manera “radial”, explotando los recursos no en un frente que se aleja del eje central de manera uniforme, sino formando una figura irregular que se puede asemejar más a una estrella o formando conglomerados de raíces finas en micrositos que presentan condiciones adecuadas para el desarrollo de raíces finas. En este caso, vuelve a ser evidente que la distribución espacial de raíces finas depende más de la distribución de las raíces laterales leñosas y de las condiciones de micrositos adyacentes que del sitio en sí, i.e. tiene más impacto en el desarrollo de raíces finas la variabilidad de concentración de nutrientes en pequeños volúmenes de suelo que el status general del suelo de la parcela. La presencia de muchos datos extremos o

“distanciados” en muestras de raíces finas pertenecientes a una misma situación (punto de muestreo) es una prueba de ello. El nivel general de fertilidad del suelo podría influir solamente en la densidad promedio de raíces finas, pero no en la variabilidad de los valores de densidad de longitud de raíces para muestras tomadas de volúmenes pequeños de suelo.

El análisis espacial de los datos a través de los mapas obtenidos mediante la técnica de interpolación lineal “kriging” del SURFER, muestra en general la elevada variabilidad espacial de los datos dentro del cuadrante menor considerado (mapas en Anexo D). En el caso del eucalipto, se puede distinguir con claridad que aún no existe una exploración total del espacio para los árboles de un año de edad, y que esta exploración es menor a medida que se desciende a estratos más profundos. Así, las raíces finas del eucalipto exploraron algo más del 50% del área del cuadrante menor en el estrato de 0-10 cm, mientras que en el estrato subsuperficial (10-20 cm) el área explorada no llegaba al 50% del cuadrante menor. A los cuatro años de edad las raíces finas del eucalipto ya han explorado el área comprendida dentro del cuadrante menor. Las raíces finas tienden a formar una especie de conglomerados a cierta distancia del eje del árbol. Esta tendencia se ve con mucha claridad en los estratos superficiales y no sigue patrón alguno por el tipo de “ambiente” (calle o banda) del suelo. Esto significa que se pueden encontrar grupos de mayor densidad tanto en las bandas de abonamiento como en las calles. A medida que se profundiza, se distinguen todavía algunos conglomerados de raíces finas. En el caso de la parcela de cinco años, en la superficie destaca solamente un conglomerado de raíces finas de eucalipto cerca de la hilera de café, atravesándola en los siguientes estratos de profundidad hasta hacerse menos evidente. En la parcela de seis años de edad, aparentemente existe una tendencia a que los conglomerados de raíces finas se hagan cada vez más grandes, ocupando mayor espacio dentro del cuadrante menor, en especial en el estrato superficial. Sin embargo, esta tendencia no se ve reforzada por el mapa para la parcela de siete años, en los que inclusive se nota una reducción de la densidad de raíces finas, posiblemente debido a la hipótesis de desplazamiento del “centro de absorción” fuera de los límites del cuadrante menor.

Las raíces finas del café aparentemente tienden a explorar sitios diferentes a los de las raíces finas del eucalipto. Esta tendencia sólo se puede identificar al observar los mapas, ya que las pruebas estadísticas utilizadas no mostraron relaciones importantes entre raíces finas de ambas especies. En la parcela de un año las raíces finas del café forman más conglomerados cerca de las bandas de abonamiento; con algunas excepciones, la misma tendencia se observa en

las demás parcelas. Por su parte, las raíces finas del eucalipto crecen a veces cerca de la banda de abonamiento pero no siempre.

Para la identificación de posibles relaciones de competencia se convirtieron los datos de DRL al parámetro de distancia media entre raíces (r , cm) (Gillespie 1989). Los valores de " r " para la evaluación preliminar de competencia que menciona Gillespie, de 0.25 a 0.18 cm, no se alcanzan en ningún caso, ni para las especies por separado ni para densidades aditivas, lo cual significaría que no existía competencia ni por nitratos ni por potasio en las parcelas estudiadas al momento de realizar el muestreo. Esto es posible, dado que el muestreo de raíces finas se realizó al inicio de la época de lluvias, cuando probablemente aún no se había alcanzado el límite máximo de crecimiento de raíces finas. Sin embargo, como no se separaron raíces finas vivas y muertas, se espera que la variación en densidad de raíces finas por épocas no será demasiado grande. Dado que el estudio se limitó a caracterizar la distribución espacial de raíces finas en una época, sólo se puede afirmar que en ese momento no existían evidencias de competencia según la metodología de Gillespie. Se requiere realizar muestreos en diferentes épocas para conocer si realmente existe competencia por nitratos en alguna época del ciclo de cultivo. Por otro lado, los límites propuestos por Gillespie son solamente una aproximación. Se deberían realizar estudios ecofisiológicos para definir umbrales de competencia más precisos para cada sistema agroforestal en particular.

Finalmente, se utilizó toda la base de datos de raíces finas para definir las frecuencias de clases diametrales características de las raíces finas del café y del eucalipto. Existen ligeras diferencias entre ambas especies con respecto a los patrones con que se distribuyen las diferentes clases diametrales (figuras 4.5 y 4.6). Para ambas especies existe un predominio de raíces finas de 0 a 0.64 mm de diámetro, pero para el eucalipto el porcentaje de raíces finas de 0 a 0.64 mm alcanza el 33% del total, mientras que las raíces finas del café de este diámetro llegan solo al 25% del total. Estas diferencias podrían significar una ventaja competitiva para las raíces finas del eucalipto, debido a que por tener mayor área superficial, la absorción de nutrientes es más eficiente en raíces finas delgadas. Gillespie (1989) muestra que las raíces finas de 0.02 cm de diámetro del algarrobo negro (*Robinia pseudoacacia* L.) son más eficientes que aquellas de 0.2 cm de diámetro en relación con la absorción, flujo y gradientes de concentración de potasio en el suelo. No obstante, se debe tener presente que la densidad de longitud de raíces

Figura 4.5. Distribución de clases diametrales para las raíces finas de *Coffea arabica*

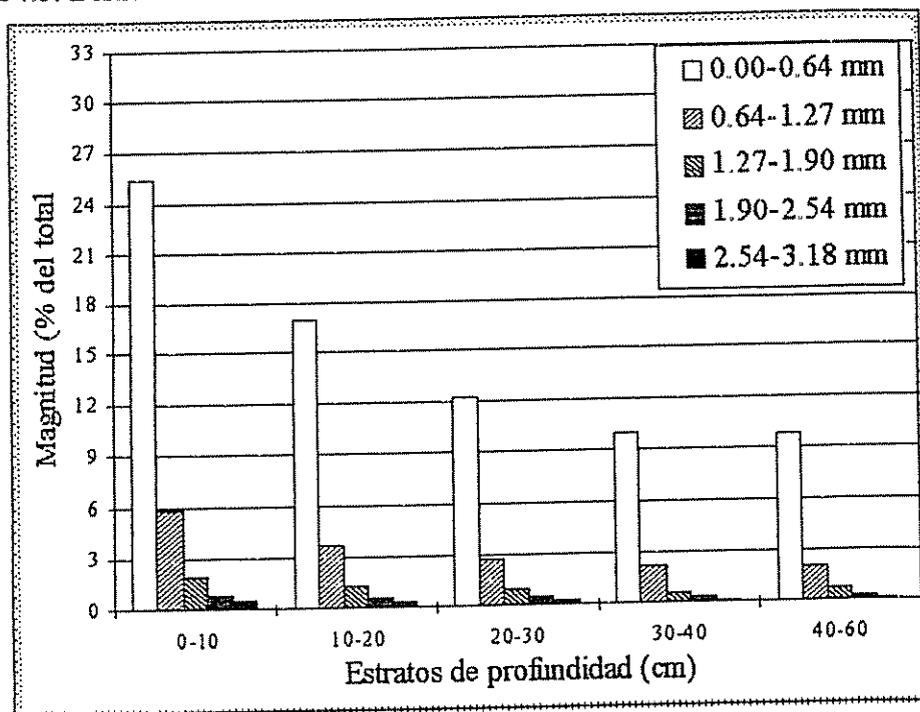
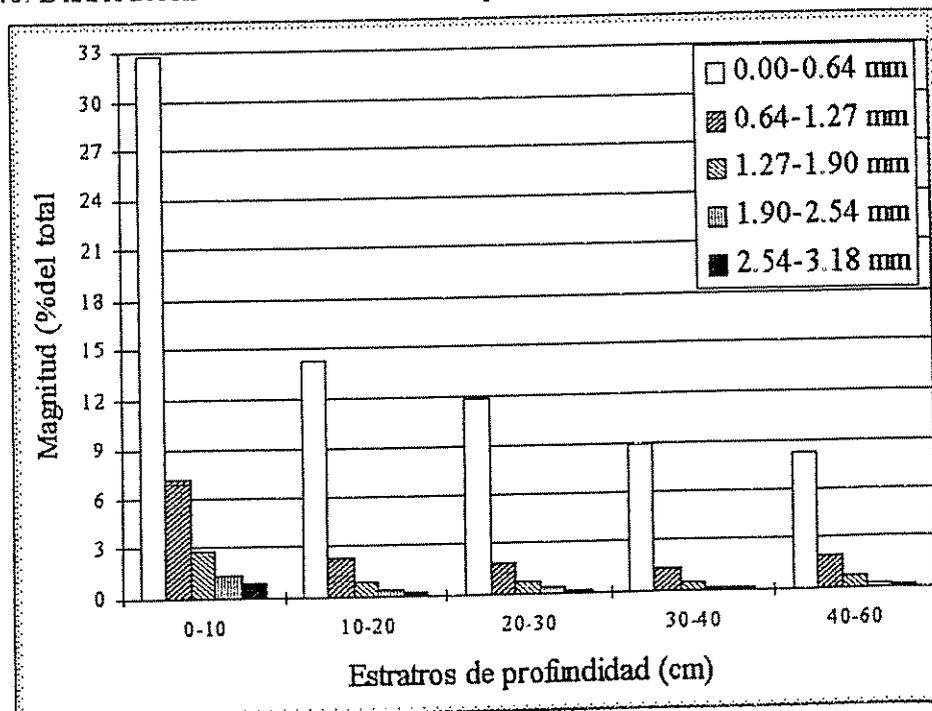


Figura 4.6. Distribución de clases diametrales para las raíces finas de *Eucalyptus deglupta*



aditiva (raíces finas de café + raíces finas de eucalipto para cada observación), con un valor máximo de 3.25 cm/cm^3 de suelo, aún es pequeña en comparación con los valores de 5 a 10 cm/cm^3 de suelo para los que Gillespie plantea una posible competencia interespecífica. El hecho de encontrar una DLR baja en las parcelas estudiadas puede estar asociado a la fertilidad del suelo (en todos los casos son andisoles provenientes de cenizas volcánicas). En este sentido, las diferencias porcentuales en diámetro de raíces finas de eucalipto y café prácticamente no desempeñaban ningún papel de importancia en el aumento de la capacidad competitiva del eucalipto en el momento de realizar el muestreo. Si la densidad de longitud de raíces aditiva sobrepasara en algún momento el límite de los 5 a 10 cm/cm^3 de suelo, estas diferencias sí empezarían a tener un rol importante a favor del eucalipto.

4.2 ARQUITECTURA DE RAICES DE EUCALIPTO

Las mediciones directas realizadas sobre las raíces pertenecientes a siete árboles extraídas del suelo, permitieron caracterizar la arquitectura de la raíz de *E. deglupta* de 7 años de edad (cuadro 4.4). Las dimensiones de extensión horizontal y vertical máxima fueron subestimadas debido a que las raíces fueron extraídas mediante tracción mecánica y sufrieron bastantes fracturas y quebraduras.

Cuadro 4.4 Características arquitecturales generales de la raíz de *E. deglupta* de 7 años de edad

Características	Rangos de Estimación
Forma general de la raíz	Sistema superficial con pivotes de anclaje a arracimada *
Tipo de crecimiento	Acropétalo
Número de raíces laterales de primer orden	7 ± 1 **
Número de raíces pivotantes	4 ± 1 **
Extensión horizontal promedio de las raíces superficiales (cm)	192 ± 24 **
Extensión horizontal máxima de raíces superficiales (cm)	328
Extensión vertical promedio de raíces pivotantes (cm)	165 ± 17 **
Extensión vertical máxima de raíces pivotantes (cm)	251
Diámetro del cuello de la raíz (cm)	37 ± 5 **

* Según Sutton y Tinus, 1983

** Intervalos de confianza al 5%

En general, la raíz del eucalipto crece superficialmente, con 3 a 5 ejes pivotantes que se introducen en profundidad, lo cual asegura el anclaje del árbol y permite a la raíz explotar estratos profundos en busca de agua y nutrientes. En una compilación acerca de estudios realizados en raíces de *Eucalyptus* sp., de Stone y Kalisz (1991), se mencionan profundidades de enraizamiento de hasta 60 m para árboles "maduros" (no se menciona su edad) como caso

extremo y raíces pivotantes que varían desde más de 6 m (*E. saligna*) a alrededor de 1.8 m (*E. grandis*, 5 años) como casos más frecuentes. No se reportó ningún estudio sobre raíces de *E. deglupta*. Las raíces pivotantes pueden ramificarse a medida que profundizan en el suelo, pero en general se observó una ramificación escasa de estas raíces. Cerca de la base de donde emergen los pivotes, crece un conglomerado de raíces leñosas en forma de racimo, con muchas ramificaciones orientadas en diferentes direcciones, formando una semiesfera o una especie de cono invertido. Por encima de este conglomerado se forman las raíces laterales, que tienden a alejarse del conglomerado de raíces y explorar el suelo superficialmente. En general, se observan pocas ramificaciones en las raíces laterales, pero en algunos sitios hubo muchas ramificaciones, lo que probablemente está relacionado con la mayor o menor disponibilidad de condiciones favorables y/o recursos. El crecimiento en un ángulo de 45° con respecto al plano horizontal es considerado como el límite entre raíces superficiales y pivotantes (Jourdan y Rey, 1996). En todos los casos, las raíces laterales crecen en ángulos mucho menores a los 45° con respecto al plano horizontal, mientras que las raíces pivotantes crecen en ángulos muy cercanos a los 90°, por lo que es fácil diferenciar ambos tipos de raíces. En contraste con las raíces pivotantes, que se consideran de primer orden, a las raíces laterales cabe considerarlas de segundo orden en adelante, aunque estas últimas suelen presentar un mayor crecimiento.

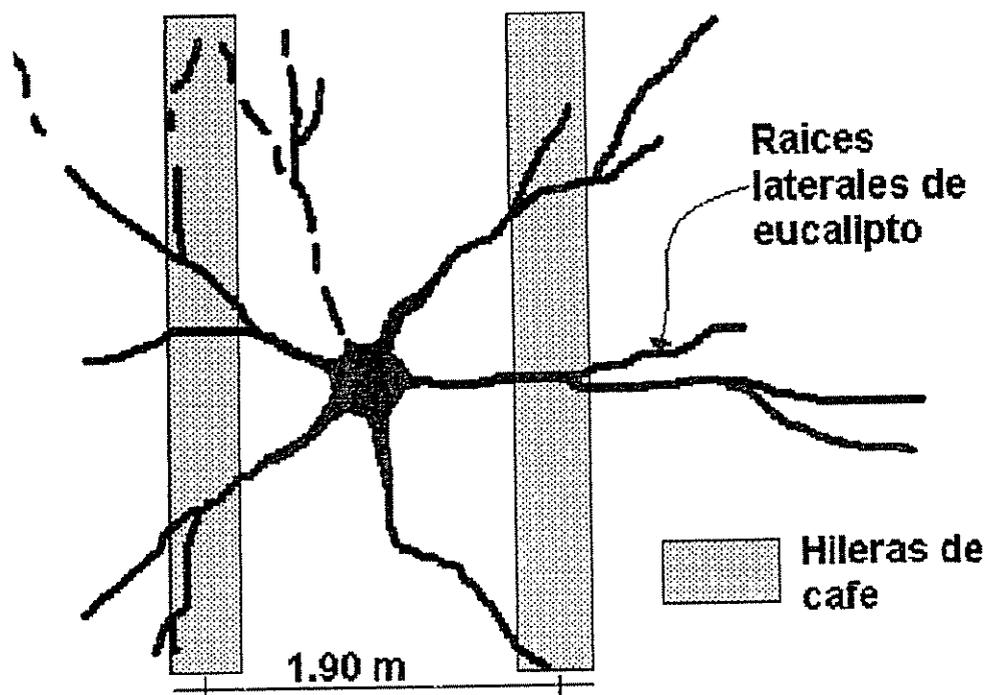
Por las características de ramificación descritas, la proyección típica de la raíz del eucalipto, en un corte transversal superficial, mostrará un crecimiento radial de 6 a 8 raíces laterales, alejándose más de 2.5 metros del eje central (figura 4.7). A medida que las raíces laterales se alejan del eje central, la proyección de raíces leñosas y finas tenderá a formar una especie de estrella o palma. Por otro lado, se pudo constatar una tendencia de algunas raíces laterales a soldarse mutuamente, cuando por motivos de crecimiento, dos de ellas se encuentran en contacto cercano.

Aparentemente, las raíces “sinker” observadas (cuadro 4.5) están asociadas a una etapa adulta de la raíz de *E. deglupta*, ya que Ashton (1975) encontró que aproximadamente a los siete años de edad, los sistemas radiculares de *E. regnans* cambian de un “tipo juvenil” a un “tipo adulto”, lo cual se refleja en el desarrollo de raíces del tipo “sinker” desde las raíces laterales. Existen diferencias morfológicas y ontogénicas marcadas entre los diferentes tipos de raíces (cuadro 4.5). Se puede suponer que estas diferencias influyen en los patrones de ramificación que

Cuadro 4.5 Características de los principales tipos de raíz de *E. deglupta*

Tipo de raíz	Orden	Crecimiento	Origen	Posición de inserción	Tropismo
Primaria Pivotante	1	Indefinido	Seminal	--	Ortogeotrópica
Secundaria Precoz	2	Definido	Radícula	Basal	Ligeramente Ortogeotrópica
Secundaria Lateral (SL)	2	Indefinido	Verticilo	Base del Pivote	Plagiogeotrópica
Secundaria Arracimada	2	Definido	Endógeno	0-45 cm	Semi Plagiogeotrópica
Terciaria "Sinkers"	3	Indefinido	Endógeno	a lo largo de SL	Geotrópica
Terciaria en SL	3	Definido	Endógeno	a lo largo de SL	Ageotrópica
Cuaternaria	4	Definido	Endógeno	a lo largo de terciarias	Ageotrópica

Figura 4.7 Esquema de crecimiento de las raíces laterales del eucalipto



ocurren a diferentes distancias del eje central del árbol. No obstante, se encontró que el grado de intrincamiento de las ramificaciones en raíces de tercer y cuarto orden es similar a diferentes distancias del árbol. Esto fue probado mediante un análisis de fractales (Anexo E) obteniéndose una dimensión de fractal de 1.64 constante para cualquier orden de ramificación del sistema radicular del eucalipto. Tatsumi *et al.* (1989) reportan valores de D que fluctúan entre 1.57 a 1.48 para raíces de varios cultivos anuales, leguminosos y gramíneos respectivamente. Ello permite suponer que la raíz de eucalipto presenta estructuras más ramificadas y de mayor complejidad que las raíces de los cultivos anuales.

Además de los patrones de ramificación se probó si era posible identificar algún tipo de relación alométrica entre las dimensiones de la base o cuello de la raíz con las dimensiones de la raíz. La única correlación significativa ocurre entre el diámetro del cuello de la raíz y la extensión horizontal de las raíces laterales, con un coeficiente de correlación de Pearson de 0.3, lo cual indica que la asociación entre las variables es directamente proporcional aunque el grado de asociación es muy débil.

Considerando que el coeficiente de correlación de Pearson no implica ningún tipo de causalidad, cabe pensar en que existe la posibilidad de encontrar alguna relación funcional entre el diámetro del cuello de la raíz con la extensión horizontal, pero no con la profundidad de las raíces pivotantes. La única regresión significativa se obtuvo para el diámetro del cuello de la raíz como variable independiente y la extensión horizontal de las raíces como variable dependiente; no obstante, esta regresión predice menos del 10 % de la variabilidad, por lo que no se puede utilizar para fines de predicción.

Las distribuciones correspondientes a las dimensiones de los segmentos, en términos de longitud aparente y longitud real, aparecen bi-modales, en especial la distribución de datos para longitud aparente, dificultando estimar alguna medida de tendencia central confiable (figuras 4.8 y 4.9). La primera observación que se desprende de estos gráficos es que las distribuciones de los datos son asimétricas, ya que se observa la tendencia a presentar unos pocos valores altos o muy altos. Esto ocurre principalmente porque eventualmente algunas ramificaciones aisladas parecen explorar el terreno en busca de recursos, creciendo sin ramificarse; mientras que la mayor parte de los segmentos se ramifican en torno a longitudes más pequeñas. El hecho de que existan dos modas entre los rangos de 0-15 y 45-60 milímetros de longitud aparente se podría interpretar como la existencia de dos tipos de estrategias de ramificación de acuerdo a diferencias ambientales. La hipótesis de que realmente existan estas dos estrategias de

Figura 4.8 Distribución de frecuencias para datos de longitud aparente

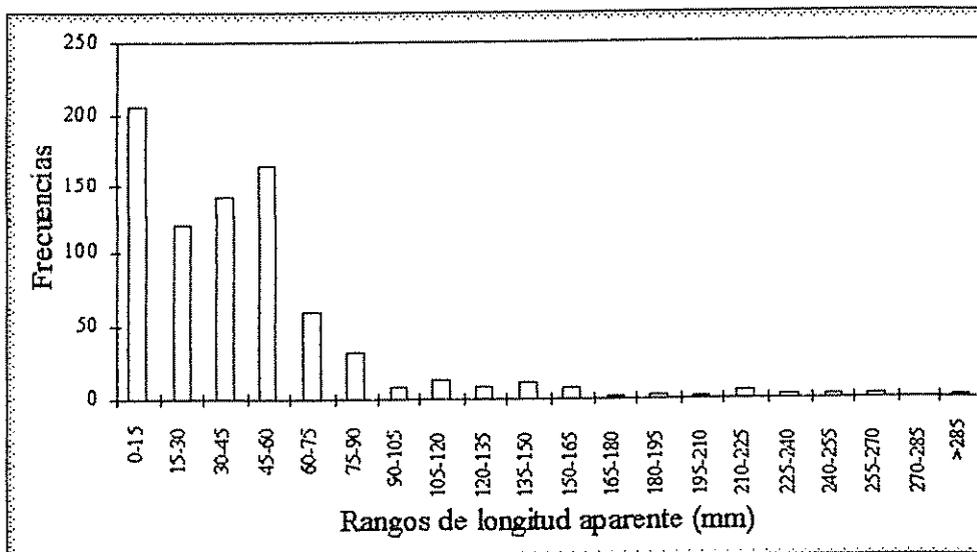
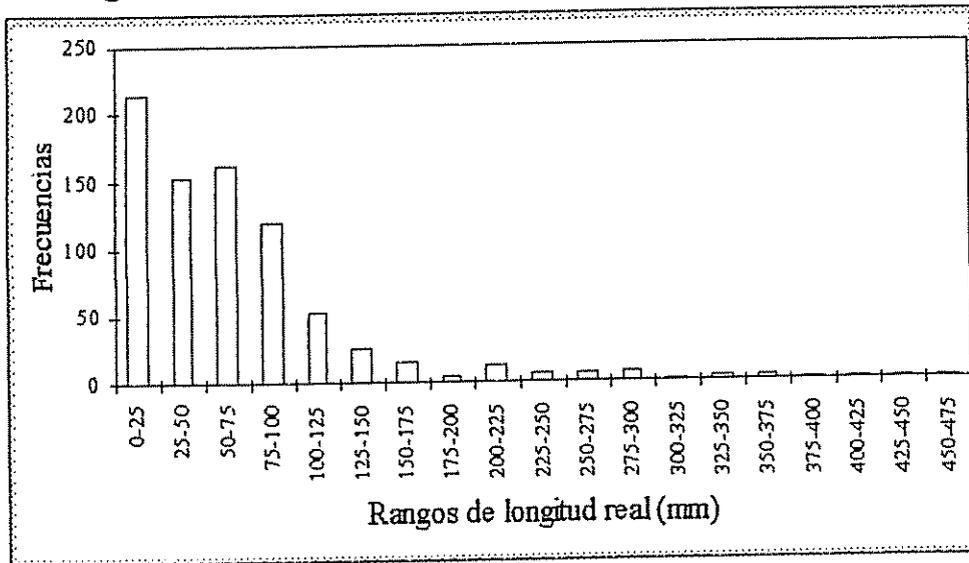


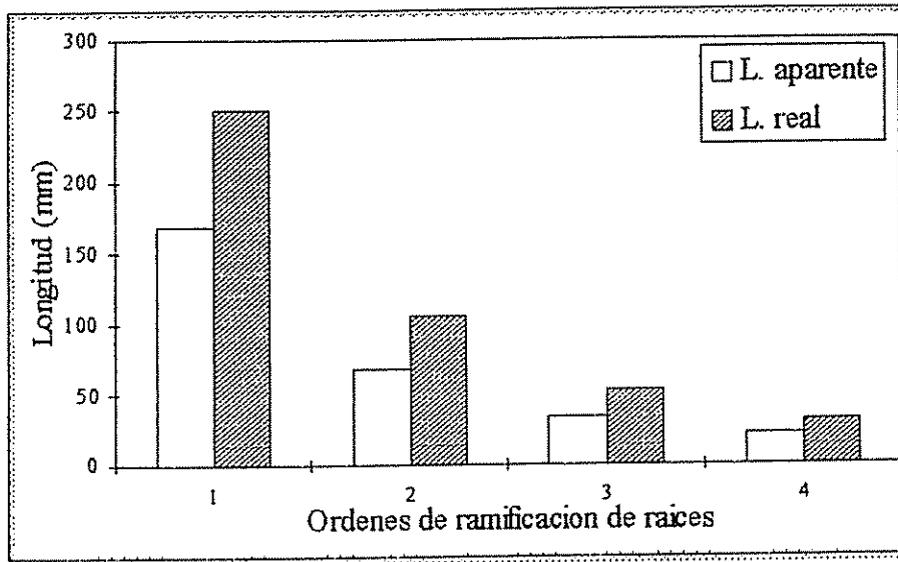
Figura 4.9 Distribución de frecuencias para datos de longitud real



ramificación y estén asociadas al sitio y no a factores genéticos, se refuerza al analizar la figura 4.9 en la que las curvas de las dos modas de longitud real se suavizan y tienen lugar a valores de 0-25 y 50-75 milímetros. Esto se debe a que la longitud aparente de las ramificaciones es la que en mayor medida determina qué sitios serán explorados por la raíz, en tanto que la longitud real es una respuesta a las resistencias y obstáculos encontrados por la raíz en su camino. El coeficiente de enrollamiento podría ser una medida indirecta del grado en que estas resistencias y obstáculos afectan a la longitud de los segmentos. Naturalmente, se requiere buscar mayor evidencia en este sentido.

Las longitudes aparentes y reales de los segmentos son significativamente diferentes según ordenes de ramificación (figura 4.10), lo cual significa que se encontró un buen indicio para suponer que las longitudes de los segmentos dependen del orden de ramificación. Esto es lógico, puesto que se espera encontrar segmentos más largos en raíces de ordenes bajos que en raíces de ordenes altos. Se concluye que la longitud promedio de los segmentos de raíz de eucalipto depende del orden de ramificación, lo cual se refuerza en cierta medida con los valores estables encontrados para la dimensión de fractal; o sea, dado que existe un grado de auto similaridad en la arquitectura de la raíz a diferentes escalas, reflejado por el valor de la dimensión de fractal D para un rango de 0.1 a 6.8 mm, se puede esperar que las longitudes de los

Figura 4. 10 Medias de longitudes aparentes y reales de segmentos de raíz de eucalipto según órdenes de ramificación



segmentos tiendan a ser menores en ordenes de magnitud creciente, porque la auto similaridad arquitectónica de la raíz se mantiene constante.

Se observó que una característica de las raíces laterales de *E. deglupta*, consiste en que en cada evento de ramificación, un segmento da origen a dos nuevos segmentos; excepcionalmente se originan tres o cuatro segmentos. Durante la adquisición de datos solo se presentaron casos de ramificaciones que originan dos nuevos segmentos, uno de diámetro mayor y otro de diámetro menor. Las distribuciones de frecuencia para los diámetros anterior y posteriores mayor y menor, también presentan una asimetría hacia la derecha. Un aspecto importante que interesa resaltar es la proporción en que el diámetro anterior se distribuye entre los diámetros posteriores. El diámetro posterior mayor recibe en un 61% de los casos una contribución diamétrica igual o mayor a 5 veces el diámetro posterior menor, lo cual es poco frecuente comparado con las proporciones que se suponen características para otras especies (Spek y van Noordwijk, 1994) y está relacionado con la morfología característica de las raíces del eucalipto que la contrastan visualmente con las raíces del café. Una de las principales características de crecimiento de las raíces laterales del eucalipto, independientemente del orden, es que existe un eje principal dominante que crece en longitud y que va hechando ramificaciones delgadas, las cuales a su vez pueden dar lugar a otros órdenes pero la contribución diamétrica a una de las ramificaciones es muy fuerte y muy débil a la otra. Este

patrón de ramificación se denomina “alotomía proporcionada” (Spek y van Noordwijk, 1994), con una relación $Di1:Di2=1:6$ ($Di1$ es el diámetro posterior menor promedio y $Di2$ el diámetro posterior mayor promedio). Existen algunas excepciones a este patrón, habiéndose observado inclusive eventos de ramificación que se aproximan más al tipo dicotómico; es decir casos en que la contribución diamétrica a las ramificaciones posteriores tiende a ser igualitaria (en una proporción cercana a 1:1). Sin embargo, en promedio, el patrón de ramificación del eucalipto sigue una alotomía proporcionada o una distribución de diámetros desigualmente proporcionada en los segmentos posteriores al evento de ramificación.

El histograma correspondiente a la distribución del parámetro alfa es multimodal con cierto grado de asimetría hacia la derecha (figura 4.11), en cambio la distribución del parámetro q es altamente asimétrica hacia la izquierda (figura 4.12). Ambas distribuciones no son normales, por lo tanto no se pueden utilizar la media aritmética y la desviación estándar de estos parámetros para la estimación de las dimensiones de la raíz, pero si otras medidas de la tendencia central más consistentes, como la mediana.

El supuesto más importante del modelo de fractales es que los patrones de ramificación (parámetros alfa y q) son independientes del diámetro de la raíz. La hipótesis de independencia fue probada mediante un análisis de correlación y regresión de alfa y q sobre el diámetro de la

Figura 4.11 Distribución de frecuencias para el parámetro de proporcionalidad alfa

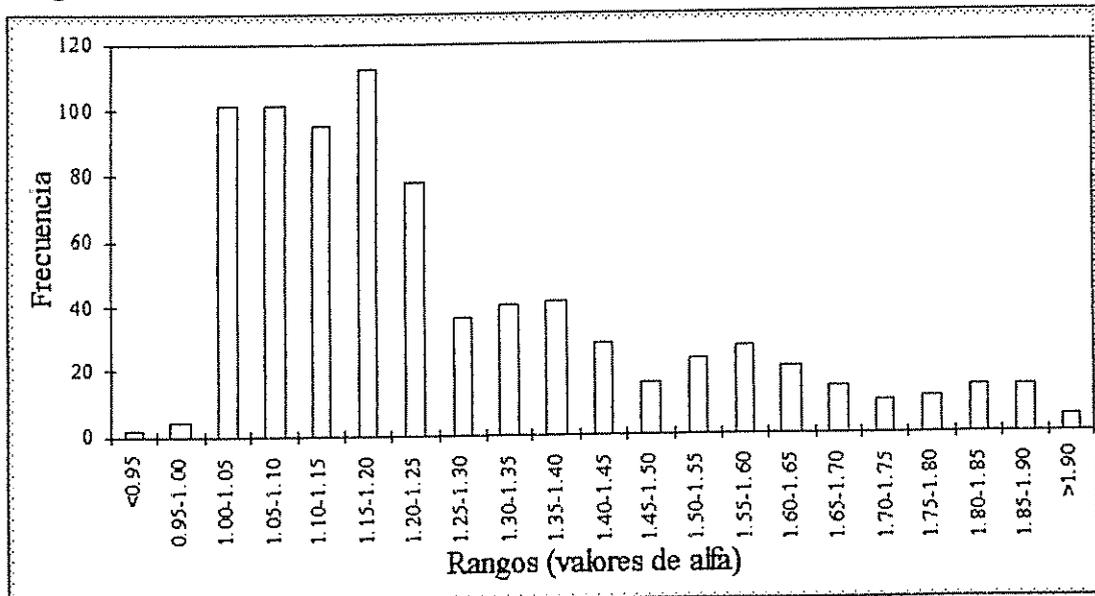
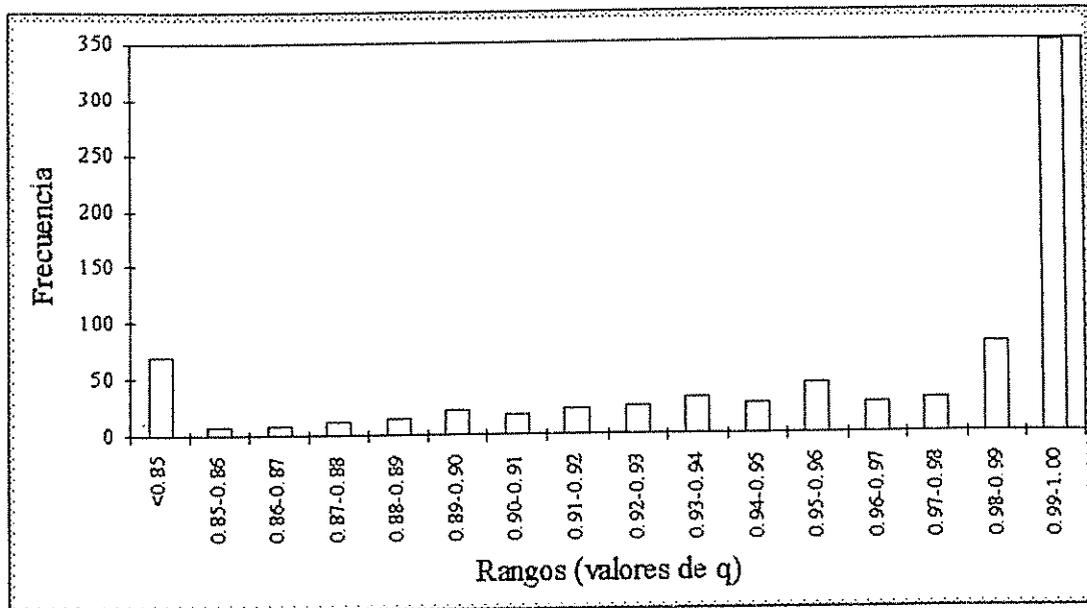


Figura 4.12 Distribución de frecuencias para el parámetro de asignación q



raíz antes del evento de ramificación. Se identificaron correlaciones significativas pero tan débiles que se puede conservar la hipótesis nula de independencia de las reglas de ramificación dentro de los límites de diámetro de 0.3 a 48.8 mm en que fluctúan los datos (figuras 4.13 y 4.14).

Las regresiones muestran una figura similar; tanto los modelos de regresión como los coeficientes estimados son significativos, pero el valor de las pendientes es tan cercano a cero que prácticamente las ecuaciones estimadas representan rectas paralelas al eje de las abscisas. Por lo tanto, con fines prácticos se acepta la hipótesis de independencia de los patrones de ramificación con respecto al diámetro y, en consecuencia, estos patrones pueden ser utilizados para realizar estimaciones respecto a las dimensiones de la raíz del eucalipto. Van Noordwijk y Purnomosidhi (1995) no encontraron una sola regresión significativa de alfa o q sobre el diámetro para 18 especies de árboles de uso múltiple en Indonesia. Encontraron una media general de 1.33 con una desviación standard de 0.54 para los valores combinados del parámetro alfa, mientras que para el parámetro de asignación "q" la media fue de 0.86 con una desviación standard de 0.15. Los valores encontrados para *E. deglupta* se aproximan a los reportados por van Noordwijk y Purnomosidhi (cuadro 4.6).

Cuadro 4.6 Estadísticas descriptivas para las estimaciones de los parámetros alfa y q

Momentos	alfa	q
Media	1.26	0.95
Mediana	1.19	0.99
Desviación estándar	0.23	0.06
Curtosis	0.40	2.81
Asimetría	1.11	-1.78
Valor mínimo	0.94	0.71
Valor máximo	1.91	1.00

Todo el anterior análisis topológico realizado tuvo por objeto probar estadísticamente los parámetros de la raíz, para determinar la confiabilidad con que estos pueden ser utilizados para predecir las dimensiones de la raíz a partir de mediciones cercanas al eje del tronco del árbol.

Figura 4.13. Diagrama de dispersión de los datos del parámetro alfa con respecto al diámetro anterior al evento de ramificación

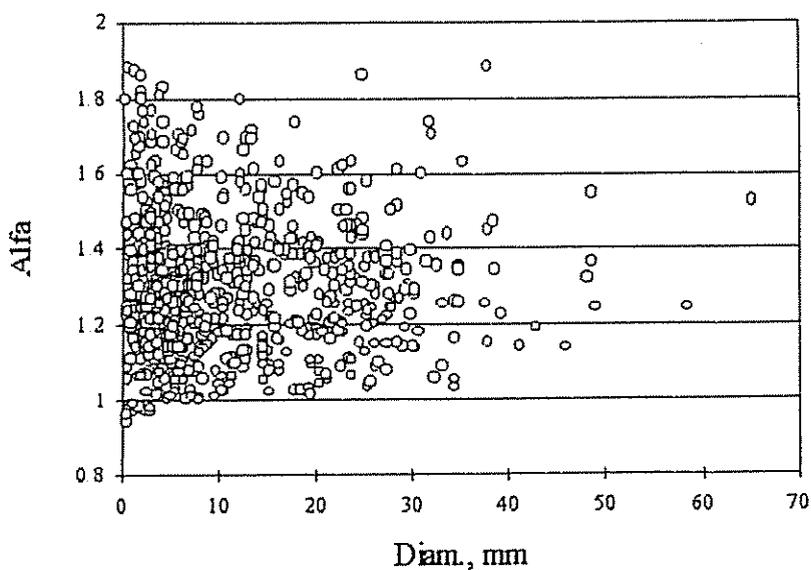
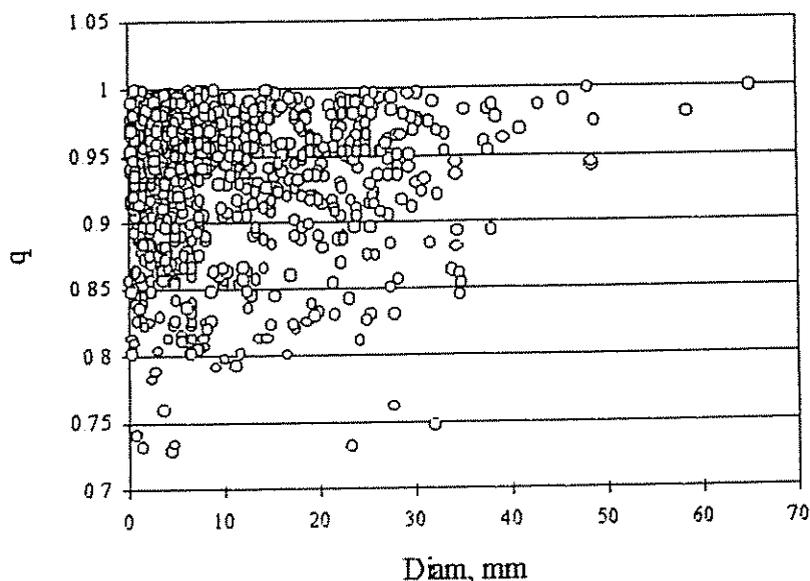


Figura 4.14. Diagrama de dispersión de los datos del parámetro q con respecto al diámetro anterior al evento de ramificación



El tipo de crecimiento de las raíces laterales del eucalipto tiene una naturaleza radial, la cual influye en el tipo de relaciones de competencia que se establecerán con el cafetal (figura 4.7). Algunas raíces laterales atraviesan las hileras de café. Se podría suponer que en la región cercana a estas raíces laterales existe una elevada probabilidad de que la presencia de pelos absorbentes, micorrizas y otras estructuras u organismos relacionados con la función de nutrición del árbol sea mayor que en regiones más alejadas. Ello implicaría que la competencia por recursos y otras interacciones entre el árbol y el café será diferenciada inclusive a lo largo de la hilera de café que limita con el árbol.

Sería interesante poder predecir cuánto y en qué dirección crecerá en longitud una raíz lateral; por ejemplo, para planificar una dosis adicional de fertilizantes a lo largo de este recorrido. Con la información disponible sobre los patrones de ramificación de las raíces laterales de *E. deglupta*, se puede simular el crecimiento de cada raíz lateral a partir de su diámetro proximal, indicando de manera aproximada la región que será explorada por esta raíz lateral. También sería importante desarrollar nuevos trabajos en torno al análisis de la arquitectura del sistema radicular de *E. deglupta*, enfatizando en todo el sistema (si se tiene

interés en temas de ciclaje de nutrientes), o en partes del sistema, i. e. tipos de raíces (si interesa realizar estudios de competencia).

5. CONCLUSIONES

1. A pesar de que la distribución espacial de las raíces de eucalipto y café dentro de un sistema agroforestal simultáneo, no es el enfoque más adecuado para estudiar competencia interespecífica, es la mejor herramienta disponible actualmente. La densidad de raíces en longitud es un parámetro utilizado frecuentemente en la modelación "mecánica" del proceso de absorción de agua y nutrientes y un valor límite de este parámetro se ha asociado a relaciones de competencia intra- o interespecífica por nutrientes. Según estos criterios, el sistema agroforestal eucalipto-café estudiado en las condiciones del Valle Central de Costa Rica y en la época de muestreo, no presentaba ningún indicio de competencia por nutrientes. Hace falta un estudio dinámico para conclusiones más generales.

2. En las parcelas estudiadas se evidenciaron algunos casos con coeficientes de correlación Tau-b de Kendall negativos y de escasa magnitud, lo cual no indica que ya exista competencia sino que una de las dos especies tiene una mayor densidad de raíces en longitud asociada a micrositios específicos y que podrá competir con éxito en estos micrositios en caso de presentarse un déficit de agua o nutrientes. La magnitud de densidad de raíces del café aproximadamente duplica a la densidad de raíces del eucalipto, pero esto no significa que las raíces del café tengan necesariamente una mayor capacidad competitiva, sólo indica una mayor exploración del suelo. Por otro lado, las raíces finas del eucalipto tienden a ser más delgadas que las del café, con lo que potencialmente tienen mayores posibilidades de competir exitosamente con el café debido a que con una menor inversión de carbono son capaces de explorar un volumen mayor de suelo.

3. Las raíces laterales del eucalipto se desarrollan fuertemente en el estrato superficial (0-10 cm) y sub-superficial (10-20 cm) del suelo. Por sus características de crecimiento, las raíces leñosas laterales provocan una elevada variabilidad espacial de la densidad de raíces finas del eucalipto. No se evidenció una estratificación vertical en el crecimiento de raíces finas del eucalipto con respecto a las raíces finas del café. La diferenciación espacial (horizontal) aparentemente es escasa. Las raíces finas del eucalipto y del café tienden a desarrollarse más en la banda de fertilización, aunque no precisamente en los mismos micrositios; la evidencia encontrada es débil.

4. El análisis topológico demostró ser una metodología útil para la modelación de raíces leñosas laterales. En cambio, el análisis de fractales tiene todavía una aplicación práctica muy limitada. Aplicar modelos para describir disminución de densidad de raíces con la profundidad y la distancia al eje de la planta a la distribución de las raíces de árboles como el eucalipto, con sub-tipos de raíces bien definidos puede resultar en una sobresimplificación de un fenómeno mucho más complicado. Las raíces leñosas laterales como portadoras de raíces finas pueden alejarse varios metros del eje del árbol y formar conglomerados con elevada densidad de raíces finas en sitios relativamente distantes del árbol. Por lo tanto, a través del análisis topológico es muy probable llegar a describir los patrones de crecimiento de las raíces laterales portadoras de raíces finas y en función de esto llegar a comprender las causas por las que las raíces finas forman conglomerados en el espacio sin seguir ningún patrón aparente.

5. Las raíces finas del eucalipto exploran y explotan paulatinamente el área que tienen a disposición pero parece que no se vuelven a renovar las raíces finas en las áreas ya utilizadas, dando como resultado una disminución de la densidad de raíces finas cerca del árbol. Probablemente el desplazamiento del “centro de absorción” ocurre en conglomerados de raíces finas que se van alejando del eje del árbol asociadas a la ubicación de las raíces laterales y no como una franja o región continua. Se supone que con el desplazamiento del centro de absorción se modifiquen las relaciones de competencia de las raíces finas del eucalipto con las del café. Después de algunos años, es posible que los centros de absorción de árboles vecinos se traslapen y ocasionen problemas de competencia con cafetos ubicados a la mitad de distancia entre árboles.

6. En los cafetales examinados, con suelos clasificados como andisoles provenientes de cenizas volcánicas, con pocas limitaciones de fertilidad y profundidad, la densidad de siembra del eucalipto es suficientemente baja como para no provocar problemas de competencia por nutrientes. Por otro lado, la distribución de lluvias solo da lugar a un pequeño período de tiempo entre abril y mayo en que la humedad del suelo puede ser un factor crítico para la plantación. Sin embargo, la sombra en estas plantaciones fue clasificada por sus dueños como excesiva. Los factores limitantes de la producción cafetalera ocurrieron en la parte aérea, implicando que los criterios de manejo basados en relaciones aéreas fueron más importantes que las relaciones subterráneas.

7. La forma de distribución de fertilizantes en las parcelas no afectó el crecimiento y distribución de las raíces finas del eucalipto, a pesar de que debería existir un gradiente de concentración de nutrientes que va de mayor a menor de las “bandas de abonamiento” hacia las entrecalles de la plantación. Se encontraron varios conglomerados de raíces finas, siguiendo un patrón aleatorio en el espacio, lo cuál parece tener sus causas en: (a) el recorrido de las raíces leñosas laterales en el espacio, y (b) la presencia de gradientes de nutrientes en los espacios vecinos a la línea de recorrido de las raíces laterales. Por lo tanto, se puede hipotetizar que diferentes formas de distribución de fertilizantes en la parcela lograrán una mejor distribución de las raíces finas en el área, pero más que todo podrían contribuir al desarrollo de nuevos conglomerados de raíces finas a lo largo del recorrido de las raíces laterales o al crecimiento de los conglomerados ya existentes. Un aspecto que si valdría la pena investigar es el efecto de métodos de fertilización al árbol en sus etapas tempranas de desarrollo en la dinámica de desplazamiento del “centro de absorción” de la raíz del eucalipto.

6. BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. (eds.) 1993. Tropical soil biology and fertility. A handbook of methods. CAB International. 221 p.
- ASHTON, D. H. 1975. The root and shoot development of *Eucalyptus regnans* F. Muell. Australian Journal of Botany 23: 867-887.
- AWE, J. O.; SHEPERD, K. R.; FLORENCE, R. G. 1976. Root development in provenances of *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. Aust. For. 39(3):201-209.
- BALDWIN, J. P.; STEWART, H. T. L. 1987. Distribution, length and weight of roots in young plantations of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden irrigated with recycled water. Plant and Soil 97: 243-252.
- BALL-COELHO, B.; SAMPIAO, E. V. S. B.; TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B. 1992. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. Plant and Soil 142: 297-305.
- BARRANTES, J. A.; LIAO, A.; ROSALES, A. 1985. Atlas climatológico de Costa Rica. Unidad de Estudios Especiales, Instituto Meteorológico Nacional, Ministerio de Agricultura y Ganadería. 29 p.
- BENGOUGH, A. G.; MACKENZIE, C. J.; DIGGLE, A. J. 1992. Relations between root length densities and root intersections with horizontal and vertical planes using root growth modelling in 3-dimensions. Plant and Soil 145: 245-252.
- BENJAMIN, J. G.; AHUJA, L. R.; ALLMARAS, R. R. 1996. Modelling corn rooting patterns and their effects on water uptake and nitrate leaching. Plant and Soil 179: 223-232.
- BERMUDEZ, S. E. 1954. Distribución del sistema radicular de *Coffea arabica* var. Typica en cinco tipos de suelo. M Sc. Thesis. IICA. Turrialba, C. R. 60 p.
- BLANCO, N. M. s/f Cultivos industriales: café, caña de azúcar, tabaco, cacao. Managua, Nicaragua, CNES. 211 p.
- ▼ BÖHM, W. 1979. Methods of studying root systems. Springer-Verlag, Berlin. 188 p.
- BRONSHTEIN, I. N.; SEMIANDSEV, K. A. 1986. Manual de matemáticas para ingenieros. Moskva, Nauka. (en ruso). 544 p.
- BUCKLAND, S. T.; CAMPBELL, C. D.; MACKIE-DAWSON, L. A.; HORGAN, G. W. 1993. A method for counting roots observed in minirhizotrons and their theoretical conversion to root length density. Plant and Soil 153: 1-9.
- CATIE/MADELEÑA. 1994. *Eucalyptus deglupta* Blume, especie de árbol de uso múltiple en América Central. Serie Técnica No. 17. Informe Técnico No. 240. 45 p.

- CLAUSNITZER, V.; HOPMANS, J. W. 1994. Simultaneous modeling of transient three-dimensional root growth and soil water flow. *Plant and Soil* 164: 299-314.
- CONOVER, W. J. 1980. *Practical non parametric statistics*. 2 ed. John Wiley & Sons. 493 p.
- COSTES, E.; DE REFFYE, P.; LICHOU, J.; GUEDON, Y.; AUDUBERT, A; JAY, M. 1992. Stochastic modelling of apricot growth units and branching. *Acta Horticulturae* 313: 89-98.
- COUTTS, M. P. 1983. Root architecture and tree stability. *Plant and Soil* 71: 171-188.
- _____. 1987. Developmental processes in tree root systems. *Canadian Journal of Forest Research* 17: 761-767.
- CRABTREE, R. C.; BERNSTON, G. M. 1994. Root architectural responses of *Betula lenta* to spatially heterogeneous ammonium and nitrate. *Plant and Soil* 158: 129-134.
- CREMER, K. W. 1993. Taper and heartwood in roots and tree stability. *Australian Forestry* 56(1): 38-44.
- CUENCA, G.; ARANGUREN, J.; HERRERA, R. 1983. Root growth and litter decomposition in a coffee plantation under shade trees. *Plant and Soil* 71: 477-486.
- DABRAL, B. G.; PANT, S. P.; PHARASI, S. C. 1987. Root habits of *Eucalyptus*-some observations. *The Indian Forester* 113(1): 11-31.
- DALTON, F. N. 1995. In-situ root extent measurements by electrical capacitance methods. *Plant and Soil* 173: 157-165.
- DE REFFYE, P.; HOULLIER, F.; BLAISE, F.; BARTHELEMY, D.; DAUZAT, J.; AUCLAIR, D. 1995. A model simulating above- and belowground tree architecture with agroforestry applications. *Agroforestry Systems* 30: 175-197
- DEANS, J. D. 1981. Dynamics of coarse root production in a young plantation of *Picea sitchensis*. *Forestry* 54: 139-155.
- _____; FORD, E. D. 1983. Modelling root structure and stability. *Plant and Soil* 71: 189-195.
- DE RUIJTER, F. J.; VEEN, B. W.; VAN OIJEN, M. 1996. A comparison of soil core sampling and minirhizotrons to quantify root development of field-grown potatoes. *Plant and Soil* 182: 301-312.

- DHYANI, S. K.; NARAIN, P.; SINGH, R. K. 1990. Studies on root distribution of five multipurpose tree species in Doon Valley, India. *Agroforestry Systems* 12: 149-161.
- _____; PURI, D. N.; NARAIN, P. 1996. Biomass production and rooting behaviour of *Eucalyptus tereticornis* Sm. on deep soils and riverbed bouldery lands of Doon Valley, India. *Indian Forester*:128-136.
- DIEROLF, T. S.; ARYA, L. M.; YOST, R. S. 1989. Root distribution in an alley cropping system. *In: Nitrogen Fixing Tree Research Reports (EUA)*. v. 7: 9-11.
- DREW, M. C.; SAKER, L. R. 1980. Assessment of a rapid method using soil cores, for estimating the amount and distribution of crop roots in the field. *Plant and Soil* 55: 297-305.
- ESAU, K. 1977. Anatomía vegetal. Traducción al español por Pons Rossel, J. Instituto Cubano del Libro. 729 p.
- FABIAO, A.; MADEIRA, M.; STEEN, E.; KATTERER, T.; RIBEIRO, C.; ARAUJO, C. 1995. Development of root biomass in a *Eucalyptus globulus* plantation under different water and nutrient regimes. *Plant and Soil* 168-169: 215-223.
- FAO. 1981. El eucalipto en la repoblación forestal. Colección: Montes, No 11. 723 p.
- _____. 1995. Anuario de la producción 1995. FAO, Roma, Italia. Vol. 49. 235 p.
- FRANCO, C. M.; INFORTAZO, R. O. 1946. Sistema radicular do coffeeiro nos principais tipos do solo do Estado de Sao Paulo. *Bragantia* 6(9): 443-478.
- GALE, M. R.; GRIGAL, D. F. 1987. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status. *Canadian Journal of Forest Research* 17: 829-834.
- GERWITZ, A.; PAGE, E. R. 1974. An empirical mathematical model to describe plant root systems. *Journal of Applied Ecology* 11: 773-781.
- GILLESPIE, A. 1989. Modelling nutrient flux and interspecies root competition in agroforestry interplantings. *Agroforestry Systems* 8: 257-265.
- GRANT, R. F. 1993 (a). Simulation model of soil compaction and root growth. I. Model structure. *Plant and Soil* 150: 1-14.
- _____. 1993 (b). Simulation model of soil compaction and root growth. II. Model performance and validation. *Plant and Soil* 150: 15-24.
- GRIGAL, D. F. 1990. Chapter 9: mechanistic modeling of nutrient acquisition by trees. *In: Dixon, R. K.; Meldahl, R. S.; Ruah, G. A.; Warren, W. G. (eds.) Process modeling of forest growth responses to environmental stress*. p 113-123.

- GRZEBISZ, W.; FLORIS, J.; NOORDWIJK, M. van 1989. Loss of dry matter and cell contents from fibrous roots of sugar beet due to sampling, storage and washing. *Plant and Soil* 113: 53-57.
- HEERAMAN, D. A.; JUMA, N. G. 1993. A comparison of minirhizotron, core and monolith methods for quantifying barley (*Hordeum vulgare* L.) and fababean (*Vicia faba* L.) root distribution. *Plant and Soil* 148: 29-41.
- _____; CROWN, P. H.; JUMA, N. G. 1993. A color composite technique for detecting root dynamics of barley (*Hordeum vulgare* L.) from minirhizotron images. *Plant and Soil* 157: 275-287.
- HELSEL, D. R.; HIRSCH, R. M. 1992. Statistical methods in water resources. *Studies in environmental Science* 49. Elsevier. 522 p.
- HUCK, M. G. 1983. Root distribution, growth, and activity with reference to agroforestry. In: Consultative Meeting Plant Research and Agroforestry. Proceedings. ICRAF, Nairobi, Kenya. p. 527-542.
- HUGHES, K. A.; GANDAR, P. W. 1993. Length densities, occupancies and weights of apple root systems. *Plant and Soil* 148: 211-221.
- ICAFE-CICAFE. 1996. Informe anual de labores 1995. Departamento de Investigación y Transferencia de Tecnología en el Cultivo del Café. Instituto del Café de Costa Rica. 180 p.
- INFANTE, S. G.; ZARATE, G. L. 1997. Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario. Centro de Estadística y Cálculo del Colegio de Posgraduados. Chapingo, Mexico. 643 p.
- JOHN, T. V.; COLEMAN, D. C.; REID, C. P. 1983. Growth and spatial distribution of nutrient-absorbing organs: selective exploitation of soil heterogeneity. *Plant and Soil* 71: 487-493.
- JOHNSON, A. C.; JOHNSON, M. B.; BUSE, R. C. 1987. *Econometrics. Basic and applied.* Macmillan Publishing Company. 451 p.
- JOURDAN, C.; REY, H.; GUEDON, Y. 1995. Architectural analysis and modelling of the branching process of the young oil-palm root system. *Plant and Soil* 177: 63-72.
- KRASKER, W. S.; KUH, E.; WELSCH, R. E. 1983. Estimation for dirty data and flawed models. In: Griliches, Z.; Intriligator, M. D. (eds.). *Handbook of econometrics*, vol. 1: 651-698.
- KUMAR, K.; PRIHAR, S. S.; GAJRI, P. R. 1993. Determination of root distribution of wheat by auger sampling. *Plant and Soil* 149: 245-253

- KÜCKE, M.; SCHMID, H.; SPIESS, A. 1995. A comparison of four methods for measuring roots of field crops in three contrasting soils. *Plant and Soil* 172: 63-71.
- LAGEMANN, J.; HEUVELDOP, J. 1982. Characterization and evaluation of agroforestry systems: the case of Acosta-Puriscal, Costa Rica. *Agroforestry Systems* 1(2): 101-115.
- LAUENROTH, W. K.; HUNT, H. W.; SWIFT, D. M.; SINGH, J. S. 1986. Reply to Vogt *et al.* *Ecology* 67: 580-582.
- LEVIN, R. I.; RUBIN, D. S. 1996. *Estadística para administradores*. Trad. Flores, A. H. Prentice-Hall Hispanoamericana S. A. 1018 p.
- LORIMER, N. D.; HAIGHT, R. G.; LEARY, R. A. 1994. The fractal forest: fractal geometry and applications in forest science. General Technical Report NC-170. North Central Forest Experimental Station, Forest Service, USDA. 43 p.
- MADDALA, G. S. 1994. *Econometría*. Trad. Contreras, J. G. McGraw-Hill. 546 p.
- MAJDI, H.; SMUCKER, A. J. M.; PERSSON, H. 1992. A comparison between minirhizotron and monolith sampling methods for measuring root growth of maize (*Zea mays* L.). *Plant and Soil* 147: 127-134
- MILCHUNAS, D. G.; LEE, C. A.; LAUENROTH, W. K.; COFFIN, D. P. 1992. A comparison of ^{14}C , ^{86}Rb , and total excavation for determination of root distributions of individual plants. *Plant and Soil* 144: 125-132.
- MONTAGNINI, F. et al. 1992. *Sistemas agroforestales. Principios y aplicaciones en los trópicos*. OET, Oficina de Cooperación y Desarrollo Internacional de USDA, Servicio Forestal de USDA, USAID. 622 p.
- NEAVE, I. A.; FLORENCE, R. G. 1994. Effect of root configuration on the relative competitive ability of *Eucalyptus maculata* Hook. regrowth following clearfelling. *Australian Forestry* 57: 49-58.
- NEWMAN, E. I. 1966. A method for estimating the total length of root in a sample. *Journal of Applied Ecology* 3: 139-145.
- NEWSON, R. B.; PARKER, J. S.; BARLOW, P. W. 1993. Are lateral roots of tomato spaced by multiples of a fundamental distance? *Annals of Botany* 71: 549-557.
- NIELSEN, K. L.; LYNCH, J. P.; JABLOKOW, A. G.; CURTIS, P. S. 1994. Carbon cost of root systems: an architectural approach. *Plant and Soil* 165: 161-169.
- OFICINA DEL CAFE. 1983. *Manual de recomendaciones para cultivar café*. Programa Cooperativo Oficina del Café-Ministerio de Agricultura y Ganadería. 86 p.

- OYANAGI, A. 1994. Gravitropic response growth angle and vertical distribution of roots of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant and Soil* 165: 323-326.
- PAGES, L.; JORDAN, M. O.; PICARD, D. 1989. A simulation model of the three-dimensional architecture of the maize root system. *Plant and Soil* 119: 147-154.
- _____; PELLERIN, S. 1994. Evaluation of parameters describing the root system architecture of field grown maize plants (*Zea mays* L.) II. Density, length, and branching of first-order lateral roots. *Plant and Soil* 164: 169-176.
- PASSIOURA, J. B. 1981. Chapter 3: Water collection by roots. In: Paleg, L. G.; Aspinall, D. *The physiology and biochemistry of drought resistance in plants*. 492 p.
- PELLERIN, S.; PAGES, L. 1994. Evaluation of parameters describing the root system architecture of field grown maize plants (*Zea mays* L.). I. Elongation of seminal and nodal roots and extension of their branched zone. *Plant and Soil* 164: 155-167.
- PUBLICOVER, D. A.; VOGT, K. A. 1993. A comparison of methods for estimating forest fine root production with respect to sources of error. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 1179-1186.
- REIS, C. G.; REIS, M. G. F.; MAESTRI, M.; XAVIER, A.; OLIVEIRA, L. M. 1989. Crescimento de *Eucalyptus camaldulensis*, *E. grandis* e *E. cloeziana* sob diferentes níveis de restrição radicular. *Arvore* 13(1): 1-18.
- ROJAS, O. E. 1987. Zonificación agroecológica para el cultivo del café (*Coffea arabica*) en Costa Rica. Serie Publicaciones Misceláneas No. A1/OCR-87-007-ISSN-0534-5391, IICA. 83 p.
- RUHIGWA, B. A.; GICHURU, M. P.; MAMBANI, B.; TARIAH, N. M. 1992. Root distribution of *Acioa barteri*, *Alchornea cordifolia*, *Cassia siamea* and *Gmelina arborea* in an acid ultisol. *Agroforestry Systems* 19: 67-78.
- RUSSELL, R. S. 1977. *Plant root systems: their function and interaction with the soil*. McGraw-Hill Book Co. (UK). 298 p.
- SAMSON, K. B.; SINCLAIR, T. R. 1994. Soil core and minirhizotron comparison for the determination of root length density. *Plant and Soil* 161: 225-232.
- SANCHEZ, S. A. 1994. Crecimiento de *Eucalyptus deglupta* y *E. grandis* bajo tres sistemas de plantación a nivel de finca, en la zona de Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C. R., CATIE. 95 p.
- SANFORD, R. L.; CUEVAS, E. 1996. Root growth and rhizosphere interactions in tropical forests. In: Mulkey, S.; Chazdon, R.; Smith, A. (eds.) *Tropical forest plant ecophysiology*. 675 p.

- ♣ SANTANTONIO, D. 1990. Modelling growth and production of tree roots. In: Dixon, R. K.; Meldahl, R. S.; Ruah, G. A.; Warren, W. G. (eds.) Process modeling of forest growth responses to environmental stress. p 124-141.
- SAS INSTITUTE 1985. SAS users guide: basics. Version 5 edition. SAS Institute Inc. 1290 p.
- SCHROTH, G. 1995. Tree root characteristics as criteria for species selection and systems design in agroforestry. *Agroforestry Systems* 30: 125-143.
- ♠ SCHUURMAN, J. J.; GOEDEWAAGEN, M. A. J. 1965. Methods for the examination of root systems and roots. Second edition. Pudoc. Wageningen. The Netherlands. 86 p.
- SHIBUSAWA, S. 1994. Modelling the branching growth fractal pattern of the maize root system. *Plant and Soil* 165: 339-347.
- SMIT, A. L.; SPRANGERS, J. F. C. M.; SABLİK, P. W.; GROENWOLD, J. 1994. Automated measurement of root length with a three-dimensional high-resolution scanner and image analysis. *Plant and Soil* 158: 145-149.
- _____; GROENWOLD, J.; VOS, J. 1994. The Wageningen Rhizolab - a facility to study soil-root-shoot-atmosphere interactions in crops. *Plant and Soil* 161: 289-298.
- SPEK, L. Y.; VAN NOORDWIJK, M. 1994. Proximal root diameters as predictors of total root system size for fractal branching models. II. Numerical model. *Plant and Soil* 164: 119-128.
- STOKES, A.; BALL, J.; FITTER, A.H.; BRAIN, P.; COUTTS, M. P. 1996. An experimental investigation of the resistance of model root systems to uprooting. *Annals of botany* 78: 415-421.
- STONE, E. L.; KALISZ, P. J. 1991. On the maximum extent of tree roots. *Forest Ecology and Management* 46: 59-102.
- SUTTON, R. F.; TINUS, R. W. 1983. Root and root systems terminology. *Forest Science, Monograph* 24. Society of American Foresters. 137 p.
- TATSUMI, J.; YAMAUCHI, A.; KONO, Y. 1989. Fractal analysis of plant root systems. *Annals of Botany* 64:499-503.
- TOKY, O. P.; BISHT, R. P. 1992. Observations on the rooting patterns of some agroforestry trees in an arid region of north-west India. *Agroforestry Systems* 18: 245-263.
- TSEGAYE, T.; MULLINS, C. E.; DIGGLE, A. J. 1995. An experimental procedure for obtaining input parameters for the "ROOTMAP" root simulation program for peas (*Pisum sativum* L.). *Plant and Soil* 172: 1-16.

- VAN NOORDWIJK, M.; FLORIS, J.; DE JAGER, A. 1985. Sampling schemes for estimating root density in cropped fields. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 33: 241-262.
- _____; SPEK, L.; DE WILLIGEN, P. 1994. Proximal root diameter as predictor of total root size for fractal branching models. I. Theory. *Plant and Soil* 164: 107-117.
- _____; PURNOMOSIDHI, P. 1995. Root architecture in relation to tree-soil-crop interactions and shoot pruning in agroforestry. *Agroforestry Systems* 30: 161-173.
- VANDERMEER, J. 1981. *Elementary mathematical ecology*. John Wiley and Sons. 294 p.
- VOGT, K. A.; GRIER, G. C.; GOWER, S. T.; SPRUGEL, D. G.; VOGT, D. J. 1986. Overestimation of net root production: a real or imaginary problem? *Ecology* 67: 577-579.
- WEAVER, J. E. 1919. *The ecological relations of roots*. Publ. No. 286, Carnegie Institution of Washington.
- _____. 1926. *Root development of field crops*. McGraw-Hill Book Co. New York, E.U.A. 291 p.
- _____; BRUNER, W. E. 1927. *Root development of vegetable crops*. McGraw-Hill Book Co. New York, E.U.A. 351 p.
- WILHELM, W. W.; MIELKE, L. N.; FENSTER, C. R. 1982. Root development of winter wheat as related to tillage practice in Western Nebraska. *Agronomy Journal* 74: 85-88.
- WULLSCHLEGER, S. D.; LYNCH, J. P.; BERNTSON, G. M. 1994. Modeling the belowground response of plants and soil biota to edaphic and climatic change-What can we expect to gain? *Plant and Soil* 165: 149-160.

Anexo A. Descripción de perfiles de suelo de dos parcelas estudiadas; finca "Rosario"

<p>Parcela Lopez Nuevo</p> <p>Datos generales</p> <p>Horizonte A</p> <p>Horizonte BC</p>	<p>Zona de vida: Bosque premontano; Material: Ceniza volcánica; Cultivos: café con sombra de maderables; Relieve: Pie de monte con drenaje superficial hacia un río; Pendiente: 10-15%; Dirección Noreste; Erosión: moderada; Permeabilidad: moderada a leve; Drenaje: Buen drenaje; Capa freática 15 m; Humedad actual: Suelo húmedo; Raíces: abundantes en la capa humífera, hasta los 40 cm.; No hay sales; No hay piedras</p> <p>Profundidad: 0 a 33-34 cm; Color: Pardo oscuro 7.5 YR 3/2; Textura: Franco limoso; Estructura: moderada a débil o débil; bloques subangulares finos a granular; Consistencia: seco: poco duro; húmedo: friable; mojado: poco pegajoso; Plasticidad: plástico; pH: 5.4; Borde: transición gradual o suave; Raíces: presencia de muchas raíces grandes y pequeñas; Otros: presencia de poros pequeños. Densidad aparente: 0.83 g/cc.</p> <p>Profundidad: 33-34 a más de 115 cm; Color: Pardo rojizo 5 YR 4/3; Textura: Franco arcilloso limoso; Estructura: moderada; bloques angulares medianos y finos; Consistencia: seco: poco duro; húmedo: friable; mojado: poco pegajoso; Plasticidad: plástico; pH: 5.8; Raíces: pocas raíces medianas y finas, disminuyendo con la profundidad. Densidad aparente: 1.07 g/cc.</p>
<p>Parcela: Corte del Piñal</p> <p>Datos generales</p> <p>Horizonte A</p> <p>Horizonte B</p>	<p>Zona de vida: Bosque premontano; Material: Lava volcánica; Cultivos: café con sombra de maderables; Relieve: Convexo; Pendiente: 20%; Dirección Noreste; Erosión: bastante erosionado perdió parte del horizonte A; Permeabilidad: moderada; Drenaje: Buen drenaje; Capa freática 3 m por lo menos; Humedad actual: Suelo húmedo; Raíces: presencia de raíces grandes y finas casi hasta 1 mt.; No hay sales/alcalís; No hay piedras Actividad biótica: regular; Otros: la parcela fue quemada anteriormente</p> <p>Profundidad: 0 a 28 cm; Color: Pardo oscuro ceniciento 10 YR 4/2; Textura: Franco; Estructura: débil; bloques subangulares medianos a granular fino; Consistencia: seco: suave; húmedo: friable; mojado: poco pegajoso; Plasticidad: poco plástico; pH: 6.0; Borde: Claro, suave; Raíces: muchas raíces de todo tamaño; Otros: hay poros finos. Densidad aparente: 0.86 g/cc</p> <p>Profundidad: 28 a más de 100 cm; Color: Pardo amarillento 10 YR 5/4 Textura: Franco arcilloso; Estructura: moderada; bloques angulares gruesos a medianos; Consistencia: seco: poco duro; húmedo: friable a firme; mojado: poco pegajoso; Plasticidad: plástico; pH: 5.0; Raíces: pocas raíces a 80 cm, van disminuyendo con la profundidad; Otros: Poros finos. Densidad aparente: 1.04 g/cc.</p>

ANEXO B. INVENTARIO DE SAF's *Coffea arabica*+*Eucalyptus deglupta* EN LAS PARCELAS ESTUDIADAS

B. 1. FINCA "SACRAMENTO"

B. 1.1 DESCRIPCION DE LA FINCA

Ubicación: Comunidad de Naranja al lado sudoeste del área urbana.

Tamaño de la finca: Se estiman unas 50 has.

Cultivos: Café+poró, café+eucalipto, pequeñas extensiones con otras especies asociadas al café.

B. 1.2 INVENTARIO DE EUCALIPTO

La finca tiene 5 parcelas con sistemas café+eucalipto, se inventariaron tres parcelas y se desecharon una (con *E. grandis*) y otra parcela pequeña con árboles de tres años. Las parcelas 1 y 2 presentan gavetas a los lados de los árboles, en la parcela 1 bien mantenidas y en la parcela 2 con escaso mantenimiento. El Cuadro B.1 muestra la descripción de las parcelas y el inventario de árboles.

Cuadro B. 1 Inventario de *E. deglupta* en parcelas de la finca "Sacramento"

DETALLES	PARCELA 1	PARCELA 2	PARCELA 3
Superficie, m ²	4330	6123	±25000
Pendiente, %	16%	21%	25%
Dirección	70°NE	8°NE	45°NE
No. árboles (eucalipto)	87	122	±510
Tipo de siembra	Entre hileras	Entre hileras	Entre hileras
Edad de arboles, años	5	4	1
dap, cm			
valor promedio	15.40	13.60	3.38
coeficiente variación	19.79	17.92	29.44
altura, m			
valor promedio	9.71	11.15	2.00
coeficiente variación	15.03	14.29	28.53
Tamaño de muestra, arb.	15	24	68

B. 2. FINCA 'ROSARIO' - NARANJO

B. 2.1 DESCRIPCIÓN DE LA FINCA

Ubicación: Afueras de Naranjo al lado sudoeste.

Tamaño de la finca: Se estiman unas 90 has.

Cultivos: Café+poró, café+eucalipto, pequeñas extensiones con otras especies asociadas al café.

Otros: Se tienen análisis de suelos para todas las parcelas inventariadas ex- y post- plantación de eucalipto

B.2.2 INVENTARIO DE EUCALIPTO

La finca "Rosario" se extiende a ambos lados de la carretera primaria No. 1, y presenta varias parcelas con plantaciones de café+eucalipto, sin embargo sólo se consideraron tres parcelas, debido a que tienen condiciones fisiográficas y de manejo muy similares. El Cuadro B.2 presenta el inventario de estas parcelas.

Cuadro B. 2 Inventario de *E. deglupta* en parcelas de la finca "Rosario"

DETALLES	PARCELA 1 "Lopez Nuevo"	PARCELA 2 "Tronco Planes"	PARCELA 3 "Corte del Piñal"
Superficie, m ²	5590	9244	3206
Pendiente, %	23%	3%	18%
Dirección	5°SE	85°SE	88°SE
No. árboles (eucalipto)	114	188	40
Tipo de siembra	Entre hileras	Entre hileras	Entre hileras
Edad de arboles, años	6	4	5
dap, cm			
valor promedio	17.45	14.65	15.07
coeficiente variación	15.34	10.43	22.97
altura, m			
valor promedio	13.17	10.73	11.29
coeficiente variación	16.84	18.02	14.88
Tamaño de muestra, arb.	44	48	35

B.3. FINCA 'ICAFE' - HEREDIA

B. 3.1 DESCRIPCION DE LA FINCA

Ubicación: Cantón San Pedro de Barba. Al oeste de la comunidad de San Pedro

Tamaño de la finca: Aproximadamente 20 Has.

Cultivos: Ensayos para mejoramiento de café, café+eucalipto.

B.3.2 INVENTARIO DE EUCALIPTO

En la finca de ICAFE (Instituto del Café de Costa Rica) se encontró solamente una parcela con café+eucalipto, cuyo inventario se detalla en el Cuadro B.3.

Cuadro B. 3 Inventario de *E. deglupta* en una parcela de la finca "ICAFE"

DETALLES	PARCELA 1
Superficie, m2	1877
Pendiente, %	0
Dirección	-.-
No. árboles (eucalipto)	37
Tipo de siembra	Entre hileras
Edad de arboles, años	7
dap, cm	
valor promedio	26.00
coeficiente variación	16.00
altura, m	
valor promedio	12.14
coeficiente variación	10.14
Tamaño de muestra, arb	14

B. 4. ANALISIS ESTADISTICO

El análisis estadístico realizado consta de estadísticas descriptivas para cada parcela utilizando como variables de respuesta el dap y altura de los árboles muestreados; en este caso cada una de las parcelas se considera como un tratamiento. El Cuadro B. 4 resume las estadísticas descriptivas de las parcelas inventariadas.

Cuadro B.4 Estadísticas descriptivas de las parcelas inventariadas

	FINCA SACRAMENTO						FINCA EL ROSARIO						ICAFE	
	P. 1		P. 2		P. 3		P. 1		P. 2		P. 3		P. 1	
	dap	h	dap	h	dap	h	dap	h	dap	h	dap	h	dap	h
media	15.40	9.71	13.60	11.15	3.38	2.00	17.45	13.17	14.65	10.73	15.07	11.29	26.00	12.14
varianza	9.29	2.13	5.94	2.54	0.99	0.33	7.17	4.92	2.33	3.74	11.98	2.82	17.31	1.52
desv. st.	3.05	1.46	2.44	1.59	0.99	0.57	2.68	2.22	1.53	1.93	3.46	1.68	4.16	1.23
coef.	19.79	15.03	17.92	14.29	29.44	28.53	15.34	16.84	10.43	18.02	22.97	14.88	16.00	10.14
Var. %														
rango (P=95%)														
minimo	17.55	10.74	15.13	12.15	4.00	2.36	18.27	13.84	15.09	11.29	16.26	9.61	28.38	12.85
maximo	13.25	8.68	12.07	10.14	2.75	1.64	16.64	12.50	14.20	10.16	13.88	12.97	23.62	11.44
edad, añ.	5	5	4	4	1	1	6	6	4	4	5	5	7	7

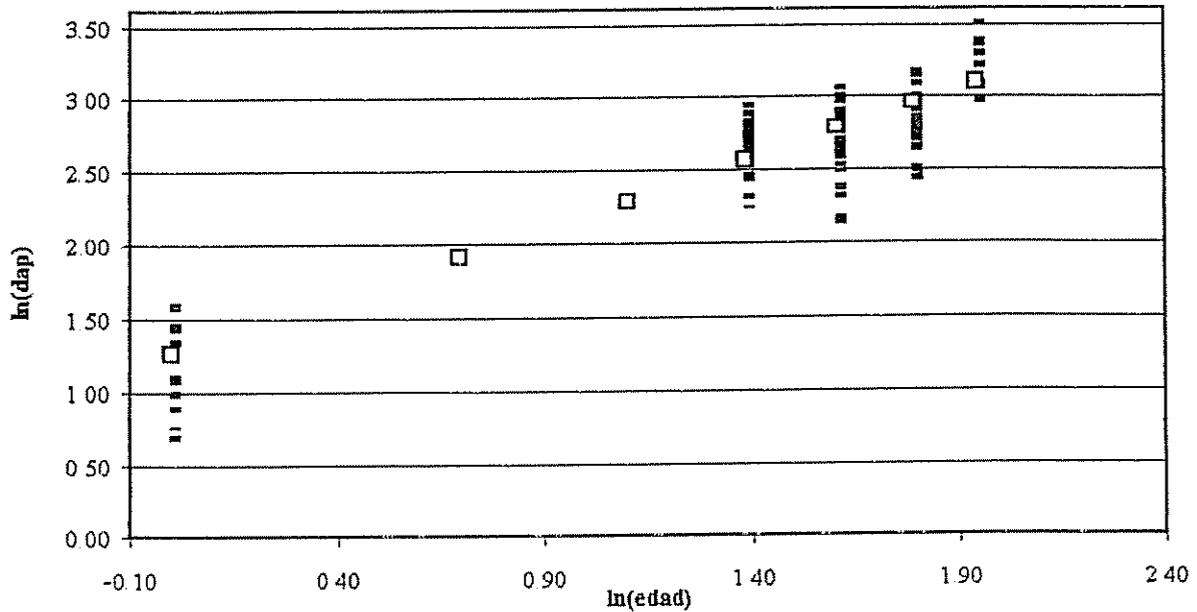
La "pseudo serie de tiempo" obtenida de esta forma se ajusta a un modelo matemático doble logarítmico donde la variable dependiente es el dap y la edad es la variable independiente, tal como se propone en la literatura (ver por ejemplo: CATIE/MADELEÑA. 1994. Serie Técnica No. 17). Se transformaron los datos originales de edad y dap a logaritmos naturales y se calculó una regresión con $\ln(\text{dap})$ como variable dependiente y $\ln(\text{edad})$ como variable independiente. La regresión resultó significativa. La figura B.1 muestra los datos transformados (*) y los valores predichos(**).

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0.897
R Square	0.805
Adjusted R Square	0.804
Standard Error	0.209
Observations	175

ANDEVA					
	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1	31.160	31.160	712.940	2.947E-63
Residual	173	7.561	0.044		
Total	174	38.722			

$\ln(\text{dap}) = \text{int.} + \ln(\text{edad})$	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>
Intercept	1.247	0.055	22.559	2.077E-53
$\ln(\text{edad})$	0.946	0.035	26.701	2.947E-63

Figura B.1 Modelo de crecimiento de dap



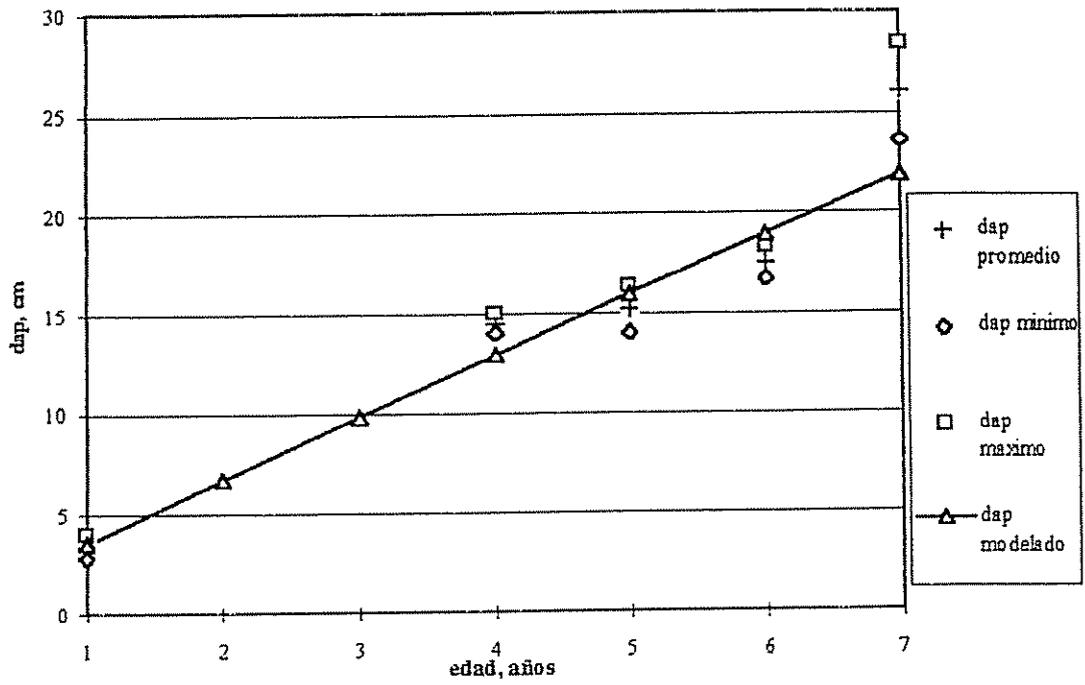
B. 5. CONCLUSIONES

El análisis anterior se utiliza para obtener criterios adecuados que permitan seleccionar los árboles que serán muestreados para el estudio de raíces finas dentro de cada rango de edad. Para el efecto, se tienen dos alternativas: (a) se pueden utilizar los valores promedios dentro de los rangos con 95% de confiabilidad, (b) se pueden utilizar los valores de dap predichos por el modelo matemático. El cuadro B.5 y la figura B.2 muestran los resultados de ambos enfoques con lo que se puede concluir que no existe demasiada diferencia en utilizar cualquiera de los dos enfoques para seleccionar la muestra; sin embargo, por su mayor exactitud, se opta por utilizar los rangos mínimo y máximo obtenidos mediante la prueba de t.

Cuadro B.5. Comparación de dap promedio con valores modelados

edad	dap promedio	dap minimo	dap maximo	dap modelado
1	3.38	2.75	4.00	3.48
2				6.70
3				9.83
4	14.44	13.93	14.94	12.91
5	15.14	14.00	16.29	15.94
6	17.45	16.64	18.27	18.94
7	26.00	23.62	28.38	21.91

Figura B.2. Comparación gráfica de dos modelos de dap vs. edad



ANEXO C. LISTADO DEL PROGRAMA BASIC PARA CALCULAR DENSIDAD DE RAICES EN LONGITUD

```

CLS
' *** c:\rld.bas ***
' Este programa realiza el proceso de archivos por lotes utilizando
' usa rejillas de 40 pixeles de tamaño
' escrito por E. Morales
PRINT "   PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LA DENSIDAD DE LONGITUD DE
      RAICES (DLR)"

PRINT
PRINT "Las salidas de este programa son DLR's por intervalos de diámetro y el"
PRINT "DLR total"
PRINT
PRINT
PRINT "Escriba el nombre del Archivo que contiene el listado de los"
INPUT "archivos de imagen y de documentación (sin extensiones):   ", lista$
110 INPUT "Indique el No. de clases diametrales requerido (0, 3, 5 o 6): ", diam
IF diam = 3 OR diam = 5 OR diam = 6 THEN
  INPUT "Ingrese el nombre del archivo de salida (--.out):         ", o$
  ELSE PRINT "El número de clases diametrales solo puede ser 0, 3, 5 o 6!!!": GOTO 110
END IF
SELECT CASE diam
  CASE 0
    OPEN o$ FOR OUTPUT AS #4
    PRINT #4, "Densidad de Longitud de Raices (DLR), en mm"
    PRINT #4,
    PRINT #4, "NombreArchivo # intercepc. DLR total"
    PRINT #4,
  CASE 3
    OPEN o$ FOR OUTPUT AS #4
    PRINT #4, "   Distribución de frecuencias para 3 clases diametrales"
    PRINT #4, "   Todos los datos corresponden a Densidad de Longitud de Raices (DLR)"
    PRINT #4, "   y están expresados en mm"
    PRINT #4,
    PRINT #4, "           Clases Diametrales"
    PRINT #4, "NombreArchivo 0.13-1.02   1.02-2.03   2.03-3.18   DLR total"
    PRINT #4,
  CASE 5
    OPEN o$ FOR OUTPUT AS #4
    PRINT #4, "   Distribución de frecuencias para 5 clases diametrales"
    PRINT #4, "   Todos los datos corresponden a Densidad de Longitud de Raices (DLR)"
    PRINT #4, "   y están expresados en mm"
    PRINT #4,
    PRINT #4, "           Clases Diametrales"
    PRINT #4, "NombreArchivo 0.13-0.64   0.64-1.27   1.27-1.90   1.90-2.54
      2.54-3.18   DLR total"

```

```

PRINT #4,
CASE 6
OPEN o$ FOR OUTPUT AS #4
PRINT #4, "    Distribución de frecuencias para 6 clases diametrales"
PRINT #4, "    Todos los datos corresponden a Densidad de Longitud de Raíces (DLR)"
PRINT #4, "                y están expresados en mm"
PRINT #4,
PRINT #4, "                Clases Diametrales"
PRINT #4, "NombreArchivo 0.13-0.51  0.51-1.02  1.02-1.52  1.52-2.03
                2.03-2.54  2.54-3.18  DLR total"

PRINT #4,
END SELECT
OPEN lista$ FOR INPUT AS #3
DO
LINE INPUT #3, i$
d$ = ".doc"
m$ = ".img"
id$ = i$ + d$
im$ = i$ + m$
OPEN id$ FOR INPUT AS #2
COUNT = 0
DO UNTIL COUNT = 3
    INPUT #2, x$
    COUNT = COUNT + 1
LOOP
PRINT INPUT$(14, 2)
CLS
INPUT #2, col
PRINT INPUT$(14, 2)
CLS
INPUT #2, row
CLS
CLOSE #2
musor = 0
OPEN im$ FOR INPUT AS #1
polo = 0
c1 = 0: c2 = 0: c3 = 0: c4 = 0: c5 = 0: c6 = 0: c7 = 0: c8 = 0: c9 = 0: c10 = 0: c11 = 0: c12 = 0
c13 = 0: c14 = 0: c15 = 0: c16 = 0: c17 = 0: c18 = 0: c19 = 0: c20 = 0: c21 = 0: c22 = 0
c23 = 0: c24 = 0: c25 = 0: c26 = 0
LOCATE 4, 8
PRINT "...Espere unos segundos mientras se procesa el archivo: "; i$; "... "
LOCATE 5, 8
PRINT "...el cu l tiene "; col; " columnas y"; row; " filas..."
cont1% = 1: cont2 = 1: cont3 = 1: basu = 39 * col: nomer = INT(row / 40): cont14% = 1
FOR cont14% = 1 TO nomer
    FOR cont1 = 1 TO basu
        INPUT #1, reg
        musor = musor + reg: cont1 = cont1 + 1

```

```

NEXT cont1
FOR cont2 = 1 TO col
  INPUT #1, reg
  IF reg = 1 THEN
    cont3 = 0
    DO UNTIL reg = 0
      INPUT #1, reg
      polo = polo + 1: cont3 = cont3 + 1
    LOOP
    SELECT CASE polo
      CASE IS > 25
        c26 = c26 + 1
      CASE 25
        c25 = c25 + 1
      CASE 24
        c24 = c24 + 1
      CASE 23
        c23 = c23 + 1
      CASE 22
        c22 = c22 + 1
      CASE 21
        c21 = c21 + 1
      CASE 20
        c20 = c20 + 1
      CASE 19
        c19 = c19 + 1
      CASE 18
        c18 = c18 + 1
      CASE 17
        c17 = c17 + 1
      CASE 16
        c16 = c16 + 1
      CASE 15
        c15 = c15 + 1
      CASE 14
        c14 = c14 + 1
      CASE 13
        c13 = c13 + 1
      CASE 12
        c12 = c12 + 1
      CASE 11
        c11 = c11 + 1
      CASE 10
        c10 = c10 + 1
      CASE 9
        c9 = c9 + 1
      CASE 8
        c8 = c8 + 1
    
```

```

CASE 7
    c7 = c7 + 1
CASE 6
    c6 = c6 + 1
CASE 5
    c5 = c5 + 1
CASE 4
    c4 = c4 + 1
CASE 3
    c3 = c3 + 1
CASE 2
    c2 = c2 + 1
CASE 1
    c1 = c1 + 1
END SELECT
polo = 0
cont2 = cont2 + cont3 + 1
END IF
NEXT
NEXT cont14%
CLOSE #1
rabo$ = "rabochoi.rab"
KILL rabo$
IntHo = c1 + c2 + c3 + c4 + c5 + c6 + c7 + c8 + c9 + c10 + c11 + c12 + c13 + c14 + c15 + c16 +
    + c17 + c18 + c19 + c20 + c21 + c22 + c23 + c24 + c25 + c26
PRINT
PRINT "N horizontales: "; IntHo
PRINT " c1 ", c1; " c2 ", c2; " c3 ", c3; " c4 ", c4
PRINT " c5 ", c5; " c6 ", c6; " c7 ", c7; " c8 ", c8
PRINT " c9 ", c9; " c10 ", c10; " c11 ", c11; " c12 ", c12
PRINT " c13 ", c13; " c14 ", c14; " c15 ", c15; " c16 ", c16
PRINT " c17 ", c17; " c18 ", c18; " c19 ", c19; " c20 ", c20
PRINT " c21 ", c21; " c22 ", c22; " c23 ", c23; " c24 ", c24
PRINT " c25 ", c25; " c26 ", c26
rab$ = "rabochoi.rab"
REM matrices din micas $dynamic
num = INT(col / 40)
DIM a(1 TO num, 1 TO row) AS INTEGER
chital = 1: wontal = 1: wonta2 = 1: chita2 = 40
OPEN im$ FOR INPUT AS #1
polni = num * 40: ostatek = col - polni: polni1 = polni + 40
DO WHILE NOT EOF(1)
    INPUT #1, regi
    IF chital = chita2 THEN
        a(wontal, wonta2) = regi: chita2 = chita2 + 40: wontal = wontal + 1
    END IF
    IF chita2 = polni1 THEN

```

```

    chital = chital - ostatok
    wonta2 = wonta2 + 1: wonta1 = 1
    polni1 = polni + chita2
END IF
chital = chital + 1
LOOP
CLOSE #1
OPEN rab$ FOR OUTPUT AS #9
gontal = 1
DO UNTIL gontal = (num + 1)
    gonta2 = 1
    DO UNTIL gonta2 = (row + 1)
        PRINT #9, a(gontal, gonta2)
        gonta2 = gonta2 + 1
    LOOP
    gontal = gontal + 1
LOOP
CLOSE #9
ERASE a
OPEN rab$ FOR INPUT AS #9
DO WHILE NOT EOF(9)
    INPUT #9, reg
    IF reg = 1 THEN
        DO UNTIL reg = 0
            INPUT #9, reg
            polo = polo + 1
        LOOP
        SELECT CASE polo
            CASE IS > 25
                c26 = c26 + 1
            CASE 25
                c25 = c25 + 1
            CASE 24
                c24 = c24 + 1
            CASE 23
                c23 = c23 + 1
            CASE 22
                c22 = c22 + 1
            CASE 21
                c21 = c21 + 1
            CASE 20
                c20 = c20 + 1
            CASE 19
                c19 = c19 + 1
            CASE 18
                c18 = c18 + 1
            CASE 17
                c17 = c17 + 1

```

```

CASE 16
  c16 = c16 + 1
CASE 15
  c15 = c15 + 1
CASE 14
  c14 = c14 + 1
CASE 13
  c13 = c13 + 1
CASE 12
  c12 = c12 + 1
CASE 11
  c11 = c11 + 1
CASE 10
  c10 = c10 + 1
CASE 9
  c9 = c9 + 1
CASE 8
  c8 = c8 + 1
CASE 7
  c7 = c7 + 1
CASE 6
  c6 = c6 + 1
CASE 5
  c5 = c5 + 1
CASE 4
  c4 = c4 + 1
CASE 3
  c3 = c3 + 1
CASE 2
  c2 = c2 + 1
CASE 1
  c1 = c1 + 1
END SELECT
  polo = 0
END IF
LOOP
IntTo = c1 + c2 + c3 + c4 + c5 + c6 + c7 + c8 + c9 + c10 + c11 + c12 + c13 + c14 + c15 + c16 +
c17 + c18 + c19 + c20 + c21 + c22 + c23 + c24 + c25 + c26
IntVe = IntTo - IntHo
CLOSE #9
PRINT "N verticales: "; IntVe
PRINT "N totales : "; IntTo
PRINT "  c1 ", c1; "  c2 ", c2; "  c3 ", c3; "  c4 ", c4
PRINT "  c5 ", c5; "  c6 ", c6; "  c7 ", c7; "  c8 ", c8
PRINT "  c9 ", c9; "  c10 ", c10; "  c11 ", c11; "  c12 ", c12
PRINT "  c13 ", c13; "  c14 ", c14; "  c15 ", c15; "  c16 ", c16
PRINT "  c17 ", c17; "  c18 ", c18; "  c19 ", c19; "  c20 ", c20

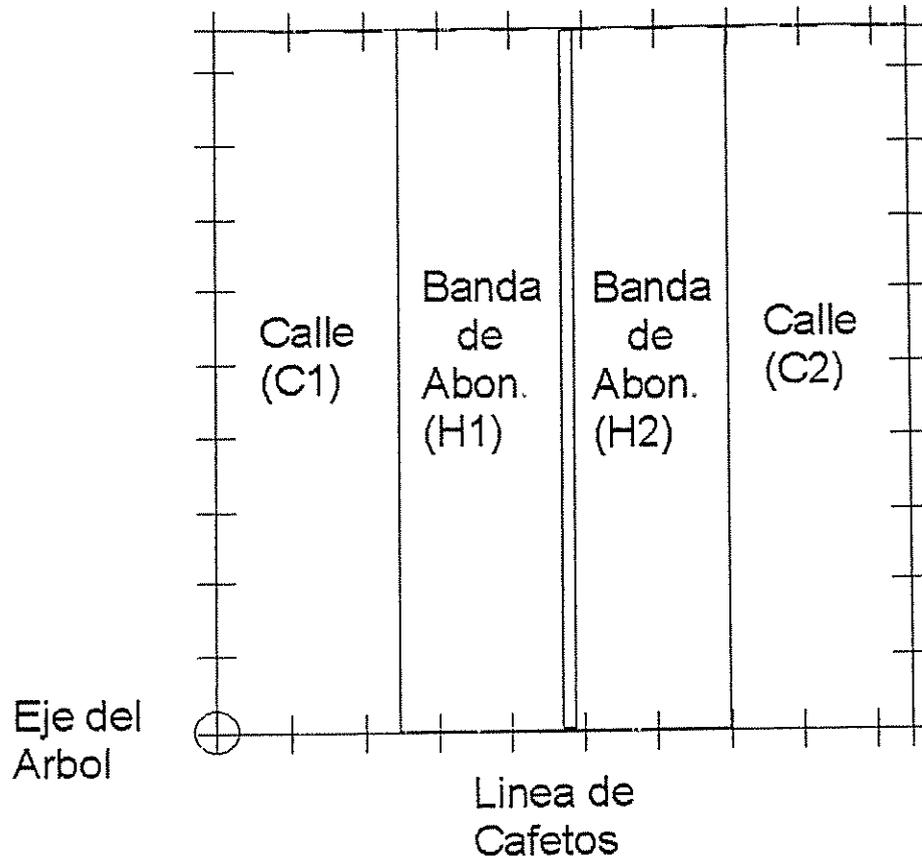
```

```

PRINT " c21 ", c21; " c22 ", c22; " c23 ", c23; " c24 ", c24
PRINT " c25 ", c25; " c26 ", c26
chislo = 3.14159265359# * 5.08002# / 4
rld1 = c1 * chislo: rld2 = c2 * chislo: rld3 = c3 * chislo: rld4 = c4 * chislo: rld5 = c5 * chislo
rld6 = c6 * chislo: rld7 = c7 * chislo: rld8 = c8 * chislo: rld9 = c9 * chislo:
rld10 = c10 * chislo: rld11 = c11 * chislo: rld12 = c12 * chislo: rld13 = c13 * chislo
rld14 = c14 * chislo: rld15 = c15 * chislo: rld16 = c16 * chislo: rld17 = c17 * chislo
rld18 = c18 * chislo: rld19 = c19 * chislo: rld20 = c20 * chislo: rld21 = c21 * chislo
rld22 = c22 * chislo: rld23 = c23 * chislo: rld24 = c24 * chislo: rld25 = c25 * chislo
rld26 = c26 * chislo
SELECT CASE diam
CASE 3
sredni = rld26 / 3
cla31 = rld1 + rld2 + rld3 + rld4 + rld5 + rld6 + rld7 + rld8 + sredni
cla32 = rld9 + rld10 + rld11 + rld12 + rld13 + rld14 + rld15 + rld16 + sredni
cla33 = rld17 + rld18 + rld19 + rld20 + rld21 + rld22 + rld23 + rld24 + rld25 + sredni
rldto3 = cla31 + cla32 + cla33
PRINT #4, im$, cla31, cla32, cla33, rldto3
CASE 5
sredni = rld26 / 5
cla51 = rld1 + rld2 + rld3 + rld4 + rld5 + sredni
cla52 = rld6 + rld7 + rld8 + rld9 + rld10 + sredni
cla53 = rld11 + rld12 + rld13 + rld14 + rld15 + sredni
cla54 = rld16 + rld17 + rld18 + rld19 + rld20 + sredni
cla55 = rld21 + rld22 + rld23 + rld24 + rld25 + sredni
rldto5 = cla51 + cla52 + cla53 + cla54 + cla55
PRINT #4, im$, cla51, cla52, cla53, cla54, cla55, rldto5
CASE 6
sredni = rld26 / 6
cla61 = rld1 + rld2 + rld3 + rld4 + sredni
cla62 = rld5 + rld6 + rld7 + rld8 + sredni
cla63 = rld9 + rld10 + rld11 + rld12 + sredni
cla64 = rld13 + rld14 + rld15 + rld16 + sredni
cla65 = rld17 + rld18 + rld19 + rld20 + sredni
cla66 = rld21 + rld22 + rld23 + rld24 + rld25 + sredni
rldto6 = cla61 + cla62 + cla63 + cla64 + cla65 + cla66
PRINT #4, im$, cla61, cla62, cla63, cla64, cla65, cla66, rldto6
END SELECT
LOOP UNTIL (EOF(3))
CLOSE #3
CLOSE #4
END

```

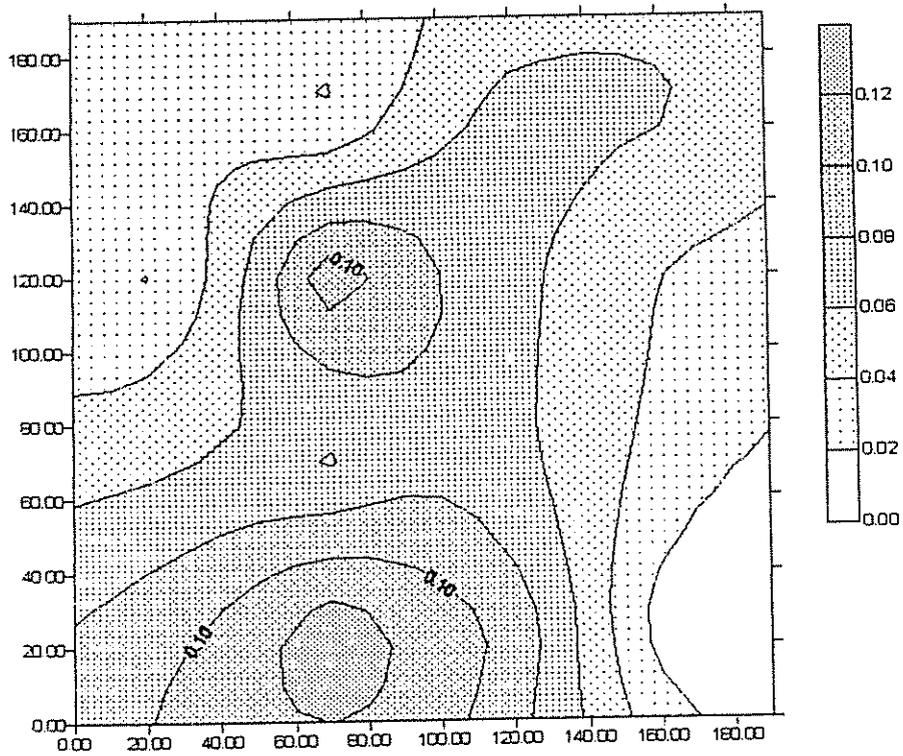
ANEXO D: MAPAS CON CURVAS DE CONTORNO DE DENSIDAD DE RAICES EN
LONGITUD (DRL, $\text{cm} / \text{cm}^3 \text{ suelo}$)



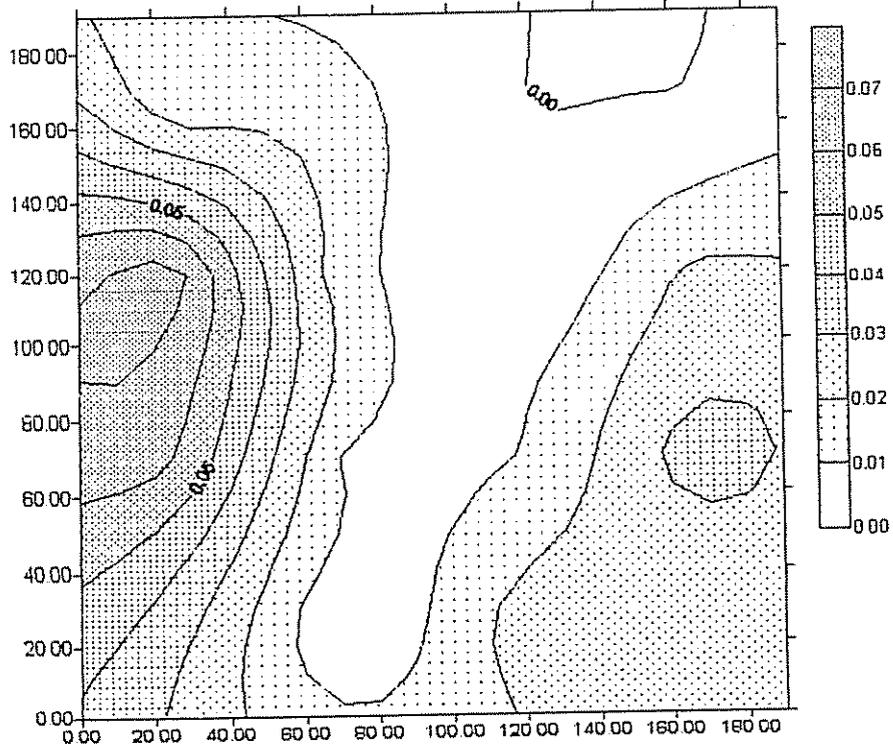
“Overlay” de los mapas

PARCELA DE 1 AÑO DE EDAD, 0-10 cm

DRL Cafe

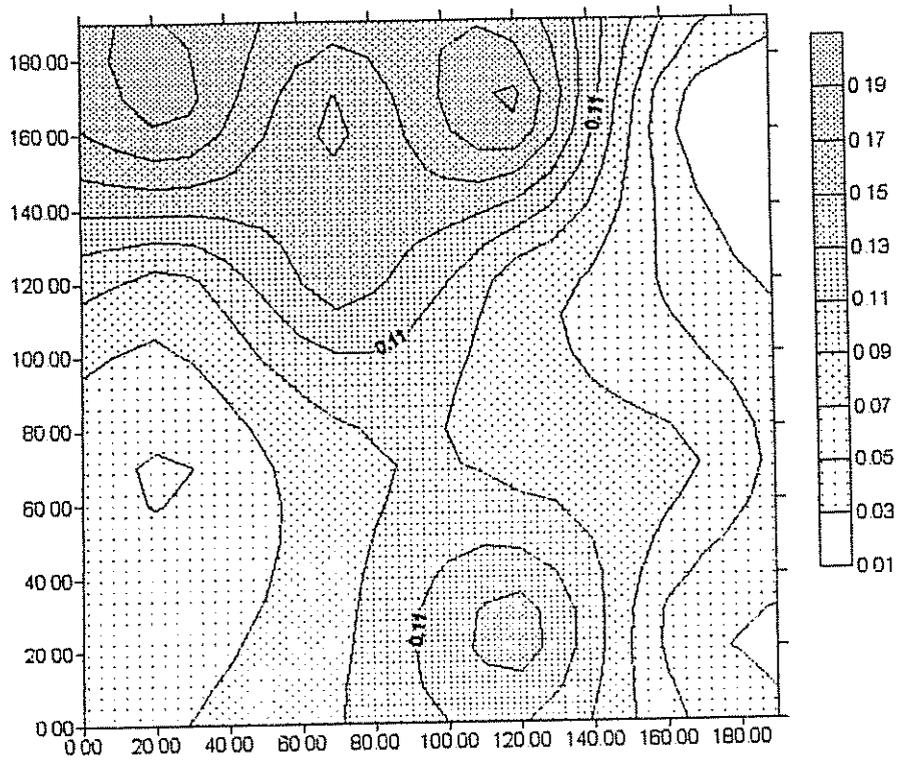


DRL Eucalipto

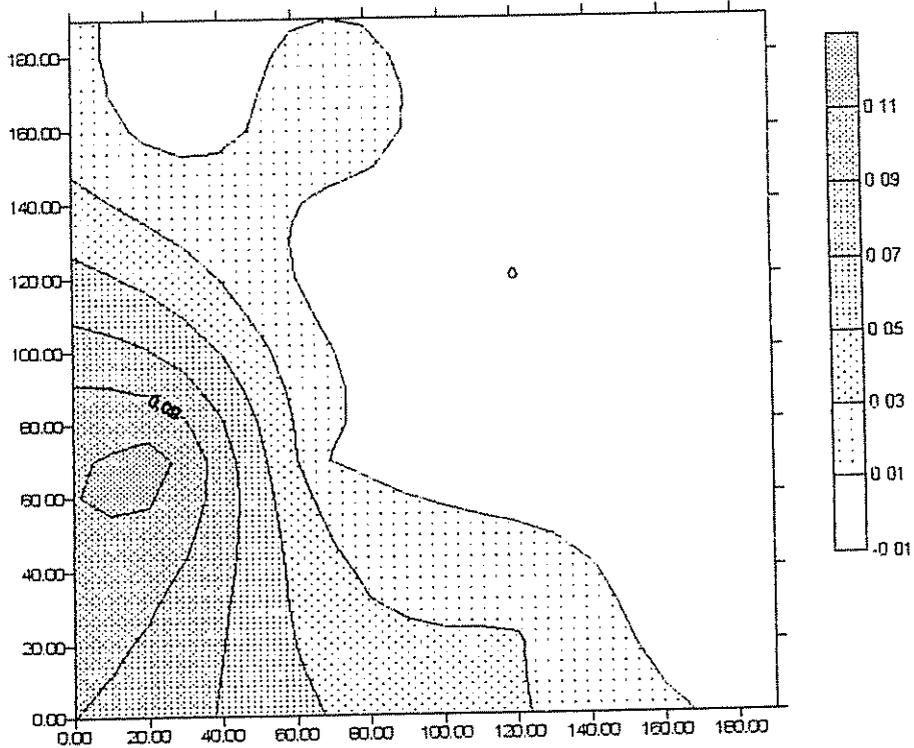


PARCELA DE 1 AÑO DE EDAD, 10-20 cm

DRL Cafe

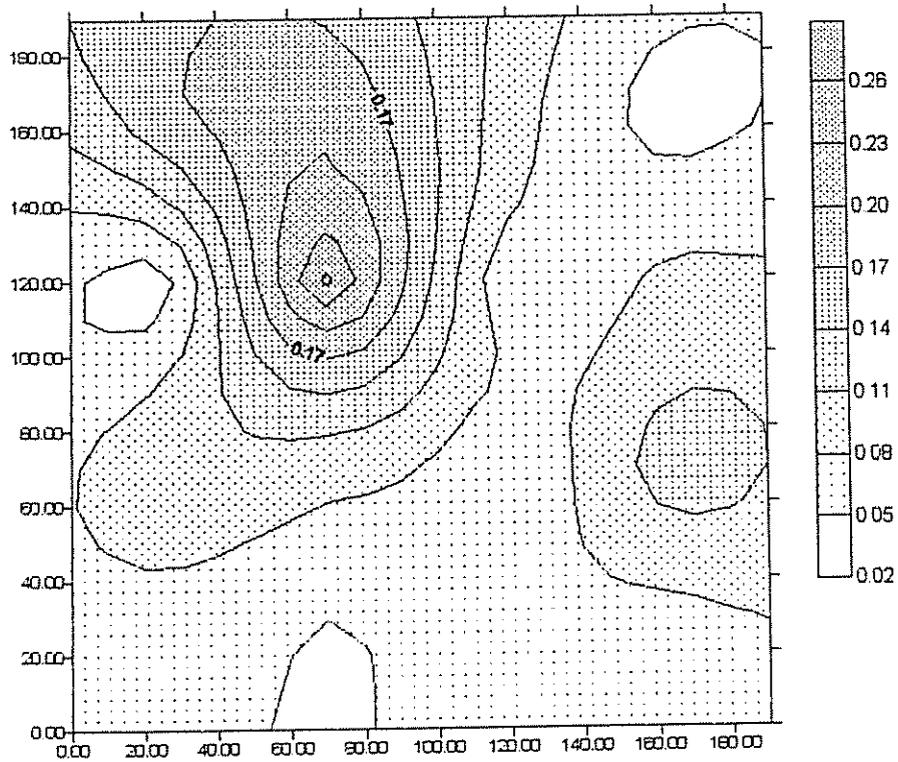


DRL Eucalipto

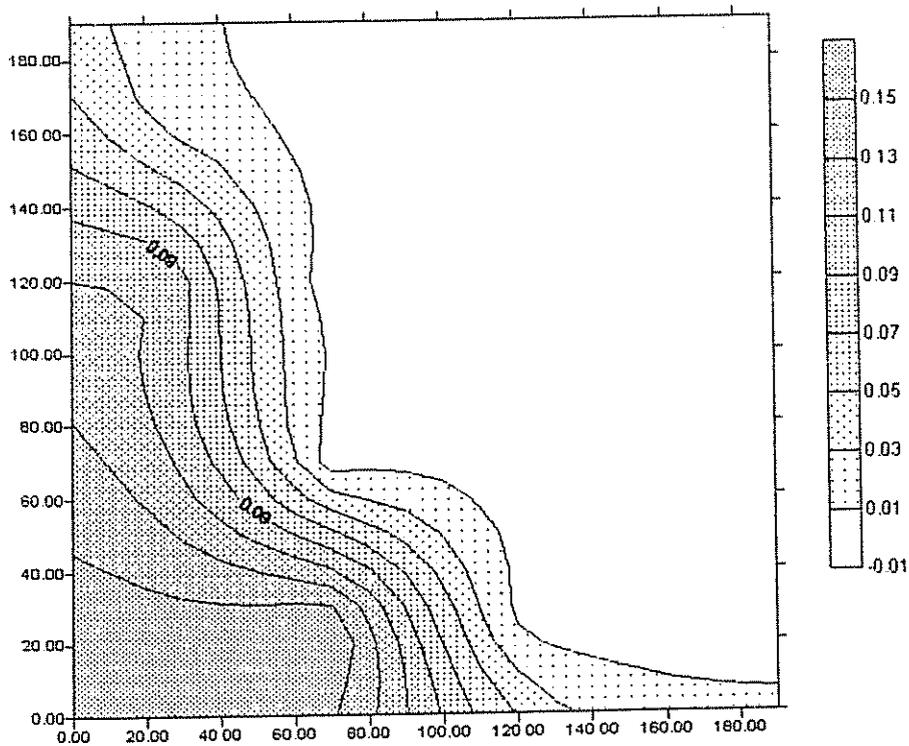


PARCELA DE 1 AÑO DE EDAD, 20-30 cm

DRL Cafe

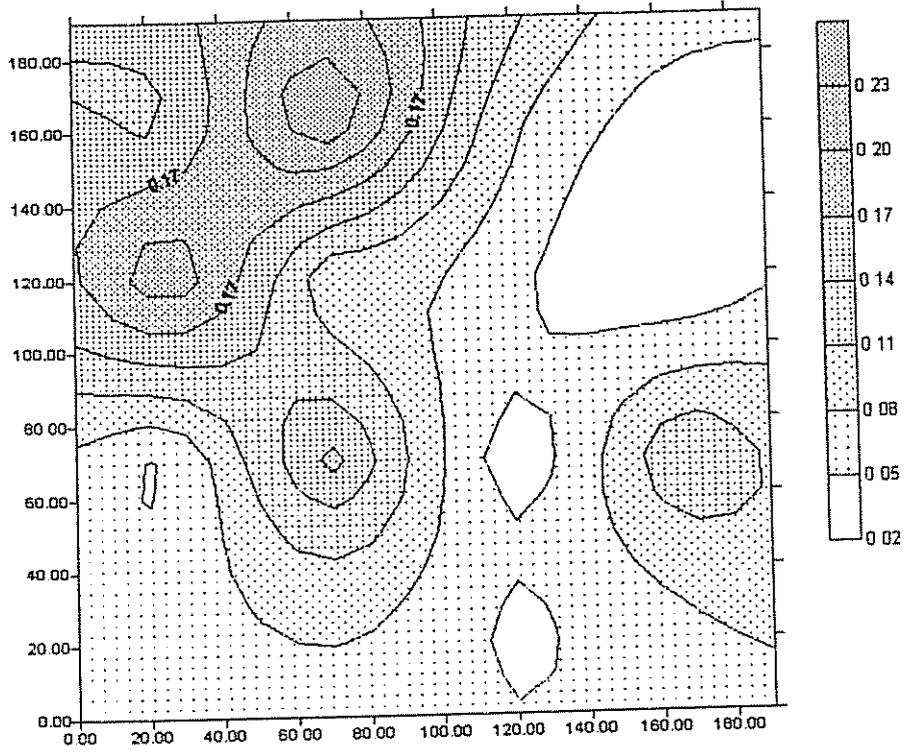


DRL Eucalipto

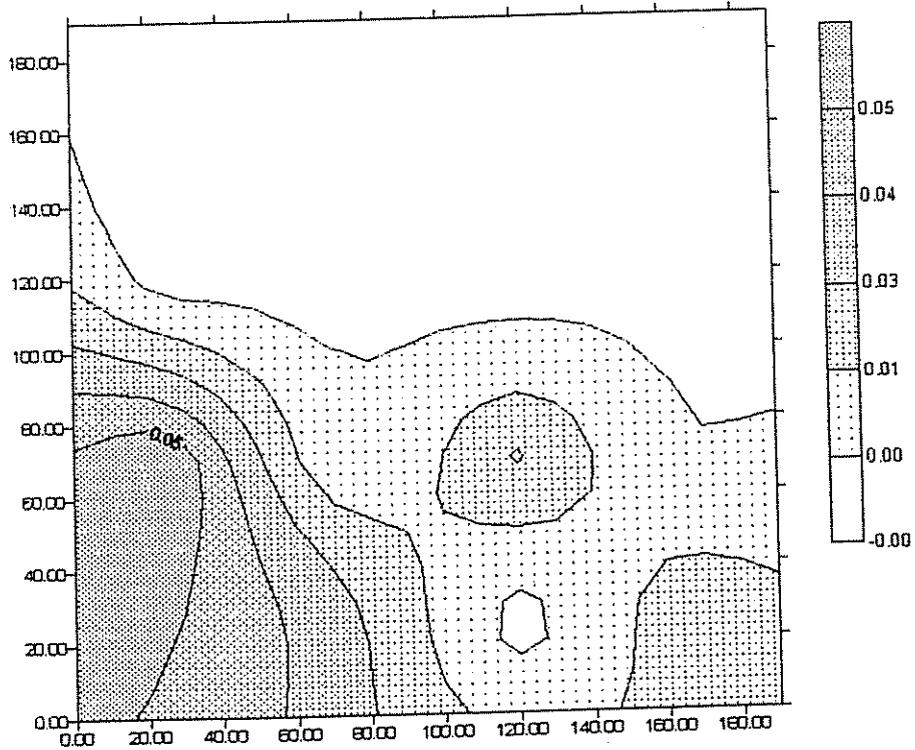


PARCELA DE 1 AÑO DE EDAD, 30-40 cm

DRL Cafe

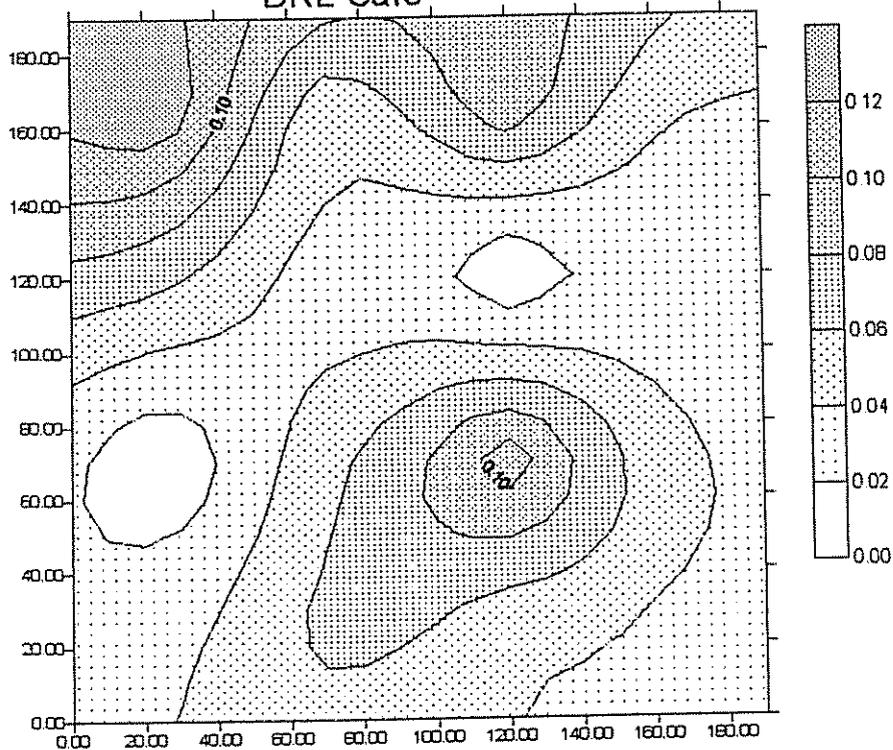


DRL Eucalipto

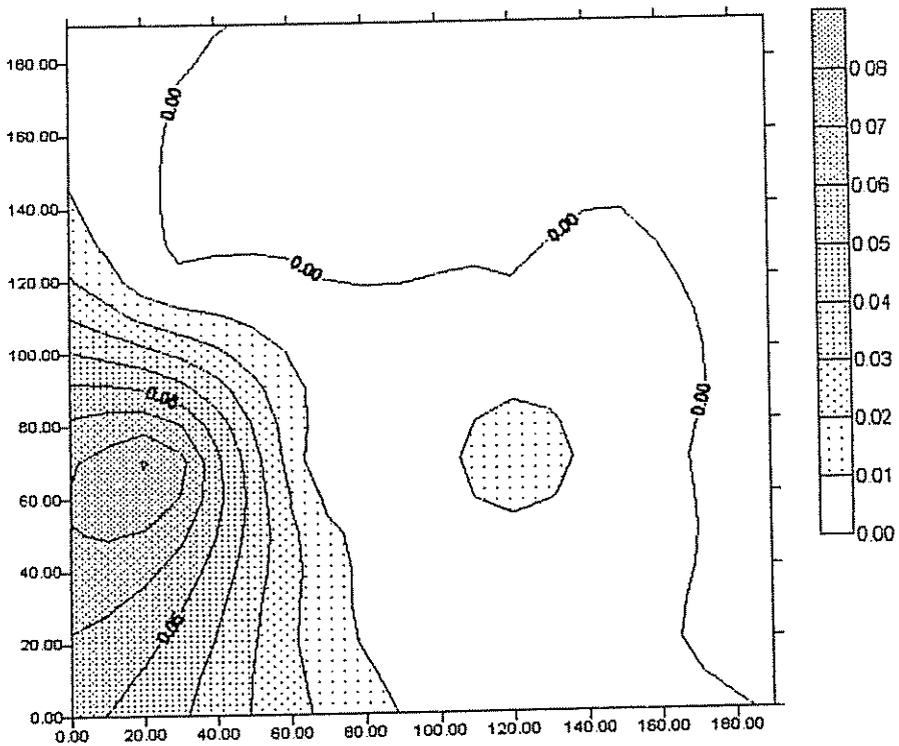


PARCELA DE 1 AÑO DE EDAD, 40-60 cm

DRL Cafe

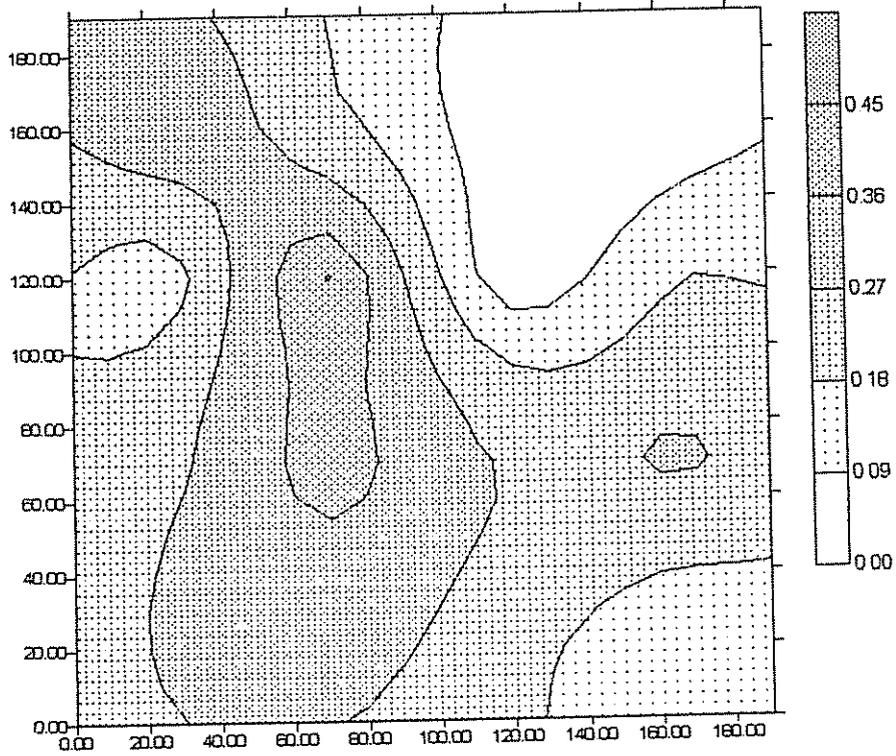


DRL Eucalipto

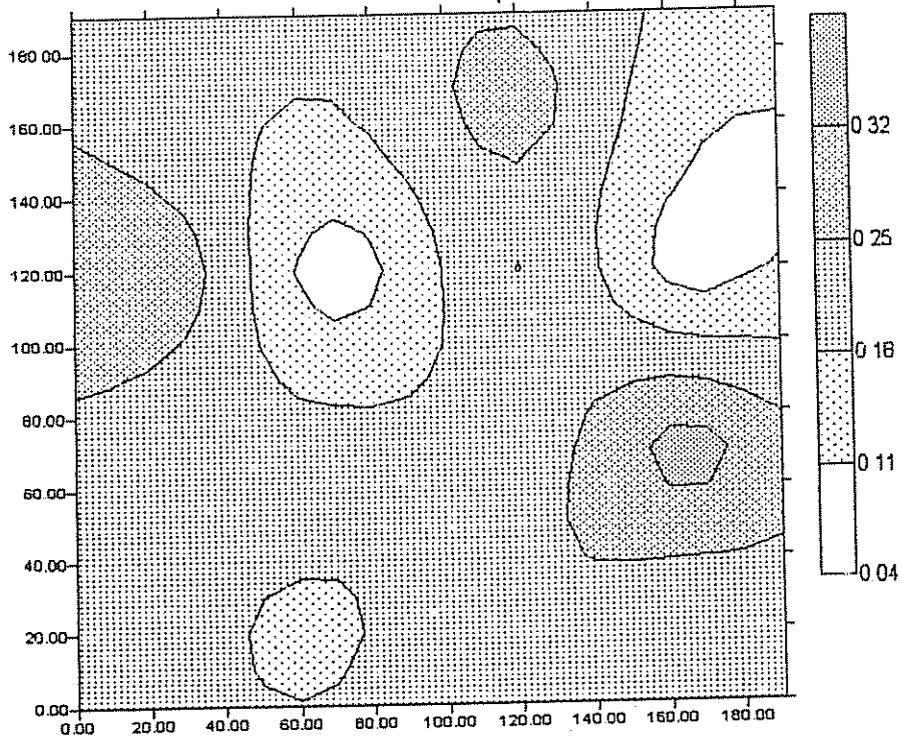


PARCELA DE 4 AÑOS DE EDAD, 0-10 cm

DRL Cafe

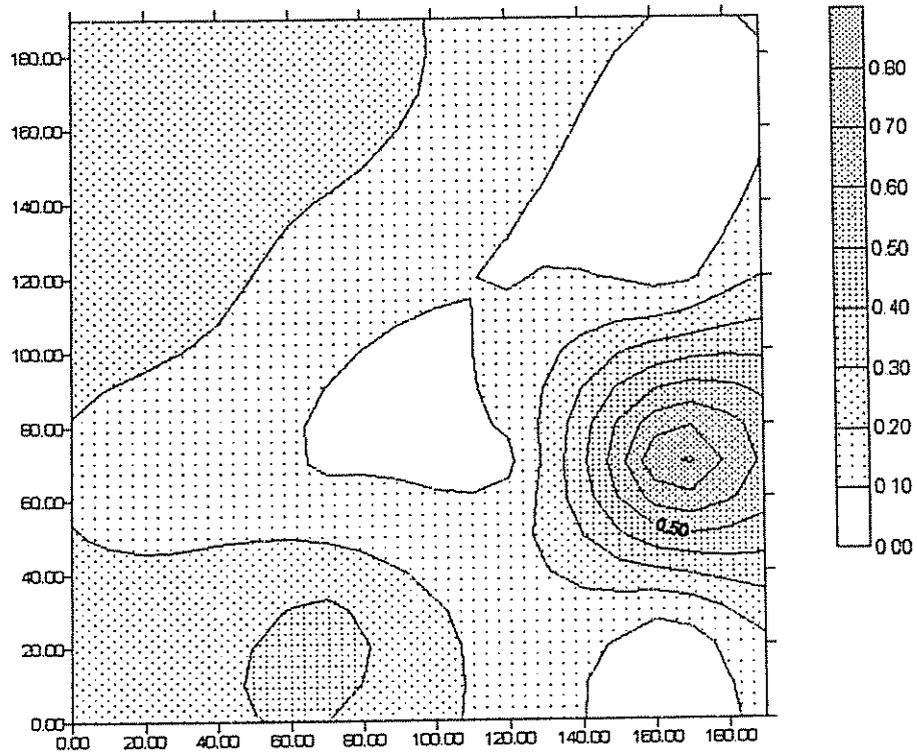


DRL Eucalipto

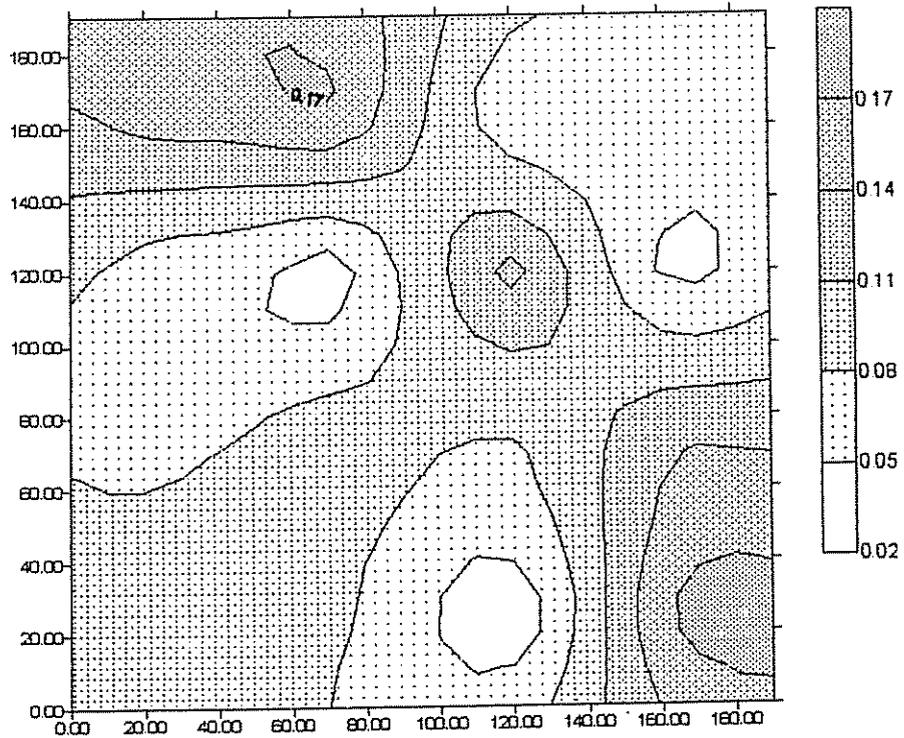


PARCELA DE 4 AÑOS DE EDAD, 10-20 cm

DRL Cafe

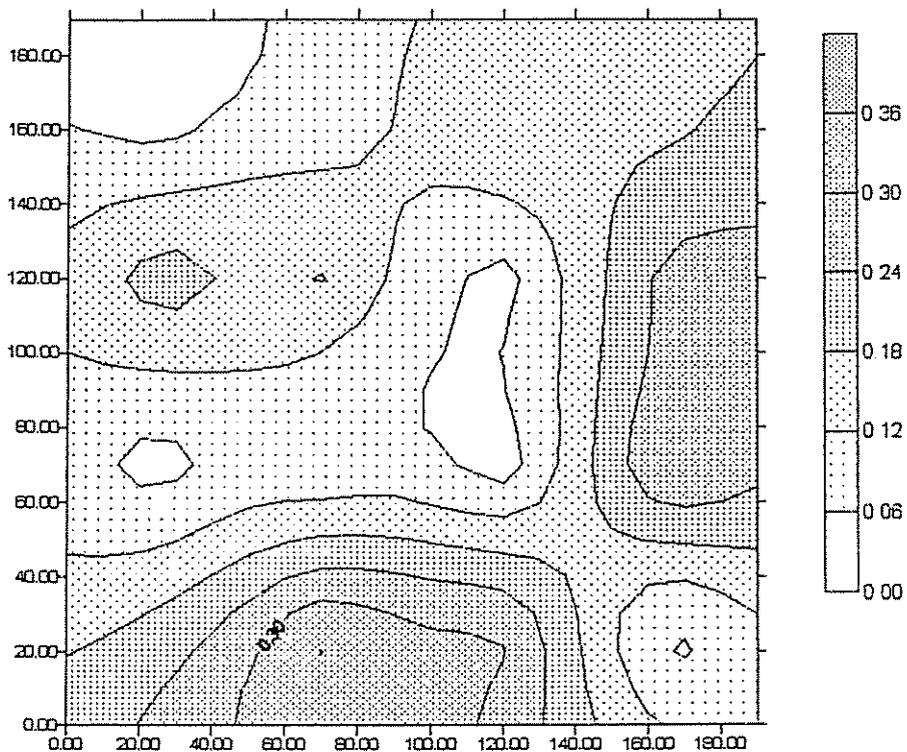


DRL Eucalipto

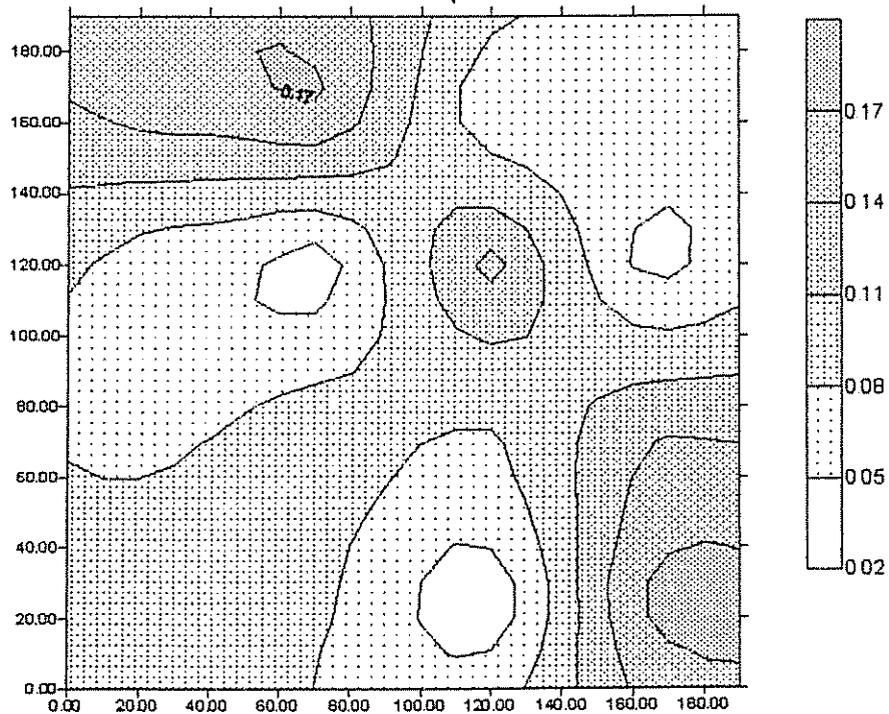


PARCELA DE 4 AÑOS DE EDAD, 20-30 cm

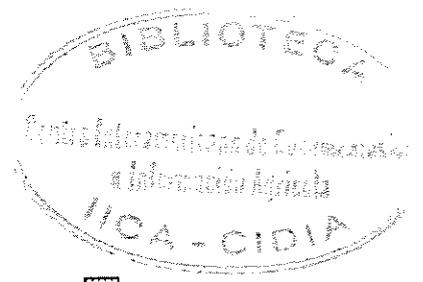
DRL Cafe



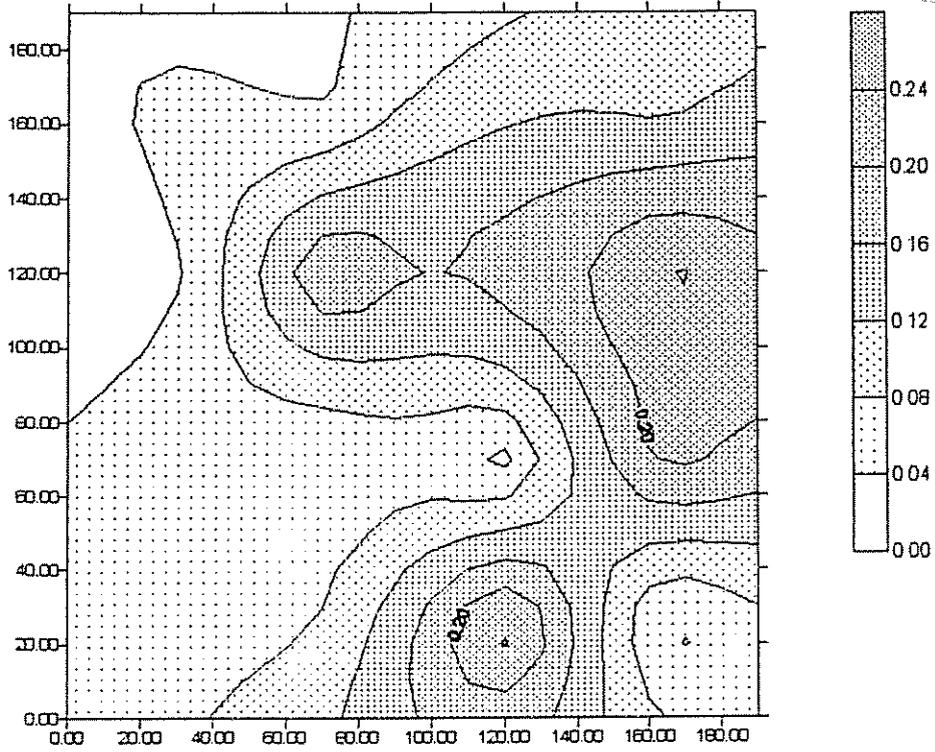
DRL Eucalipto



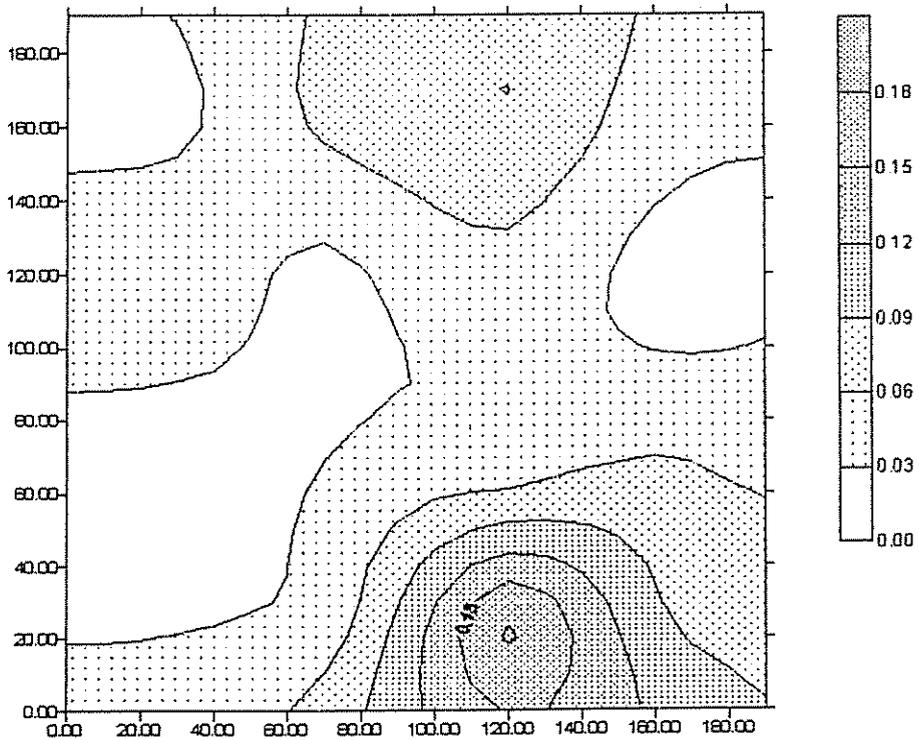
PARCELA DE 4 AÑOS DE EDAD, 30-40 cm



DRL Cafe

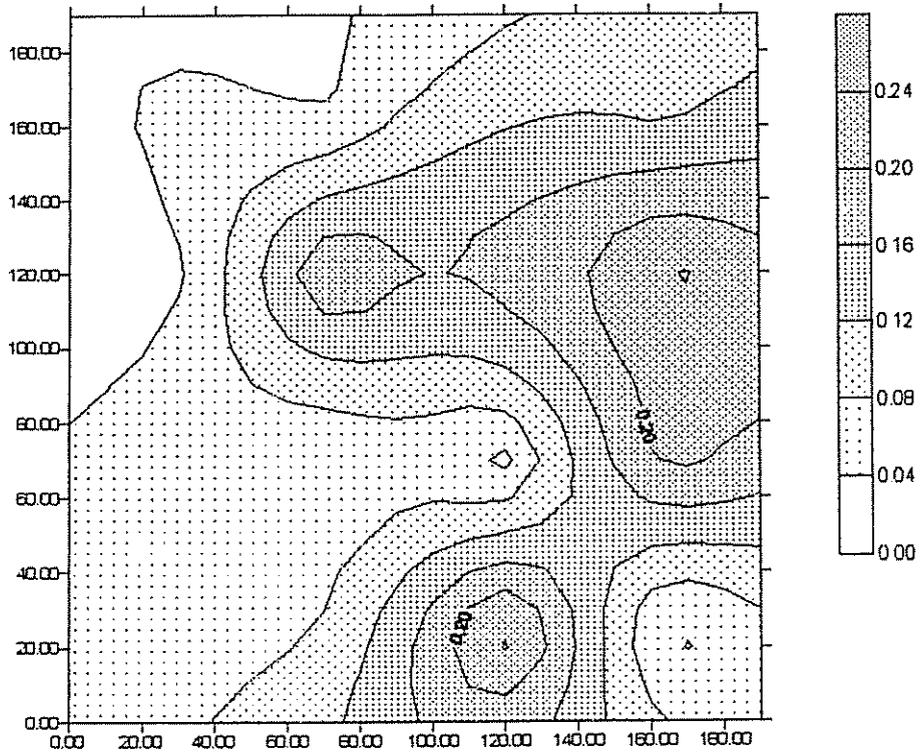


DRL Eucalipto

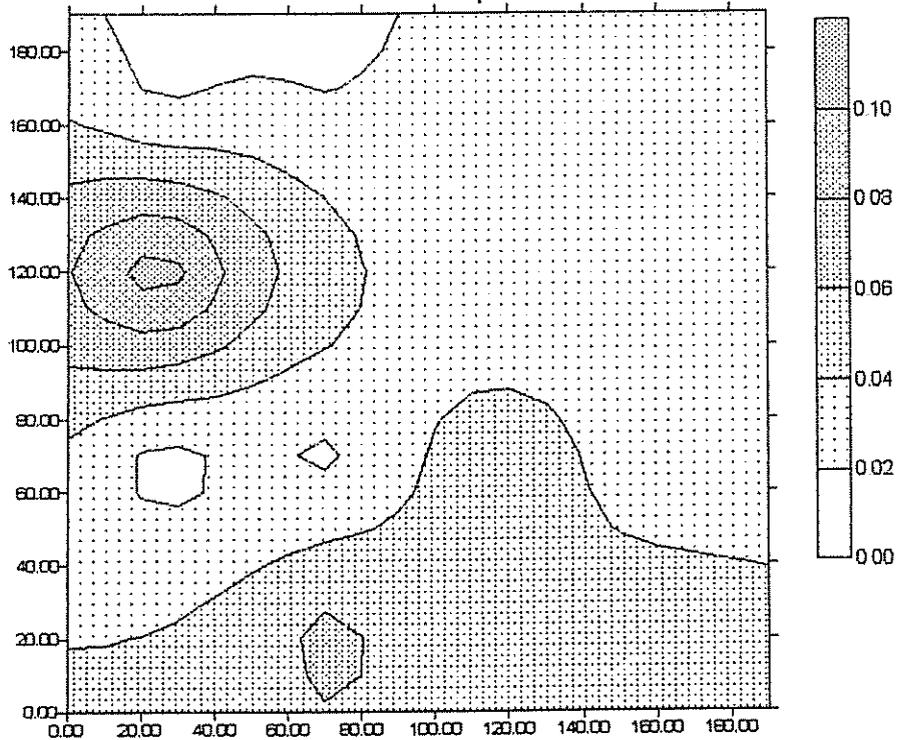


PARCELA DE 4 AÑOS DE EDAD, 40-60 cm

DRL Cafe

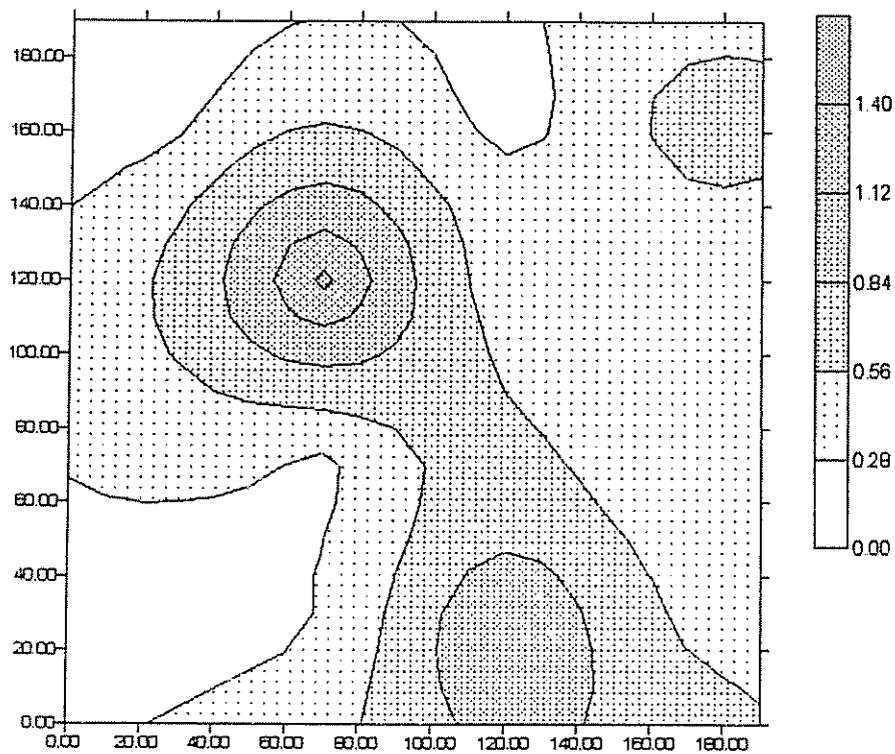


DRL Eucalipto

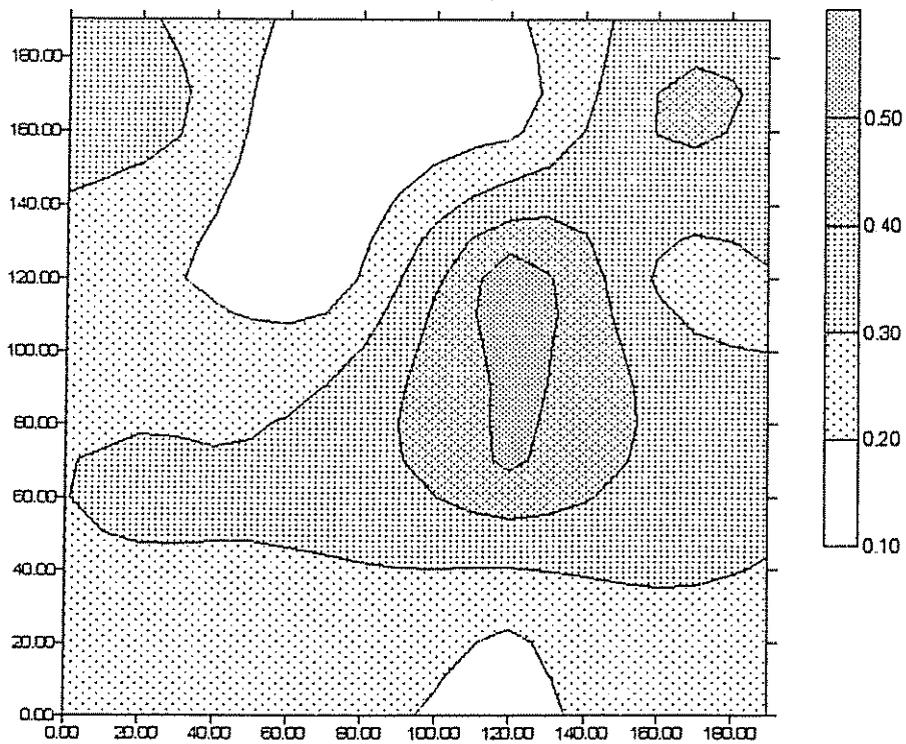


PARCELA DE 5 AÑOS DE EDAD, 0-10 cm

DRL Cafe

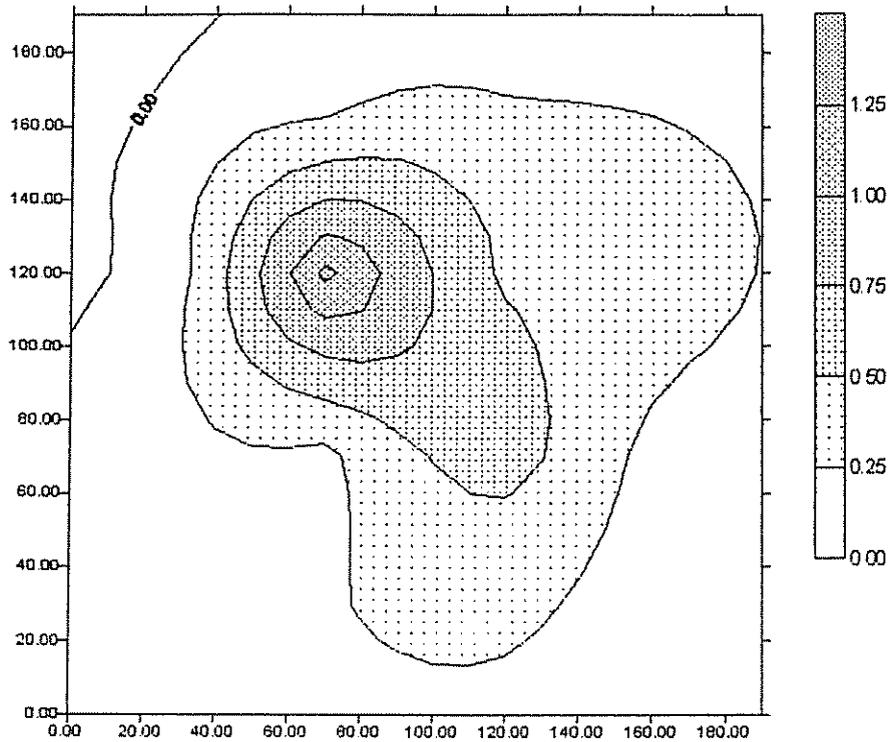


DRL Eucalipto

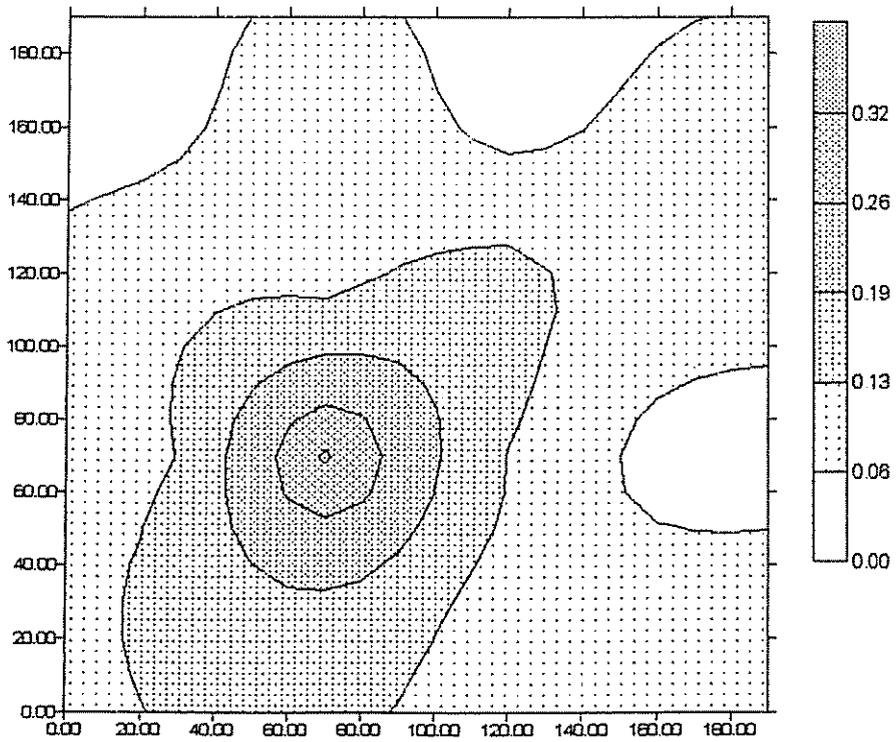


PARCELA DE 5 AÑOS DE EDAD, 10-20 cm

DRL Cafe

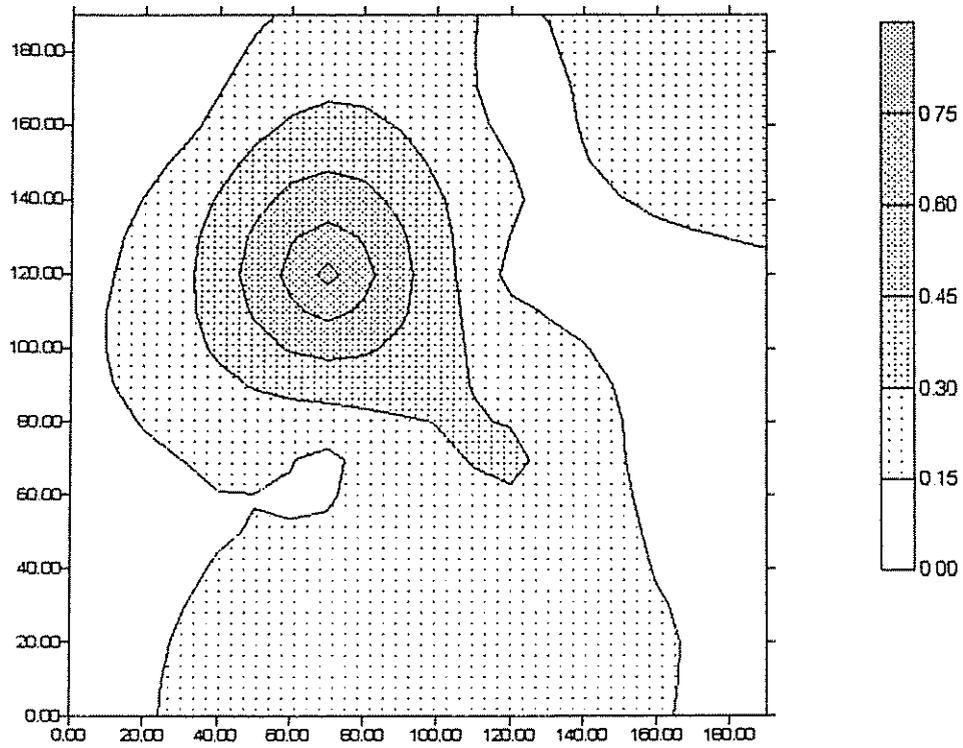


DRL Eucalipto

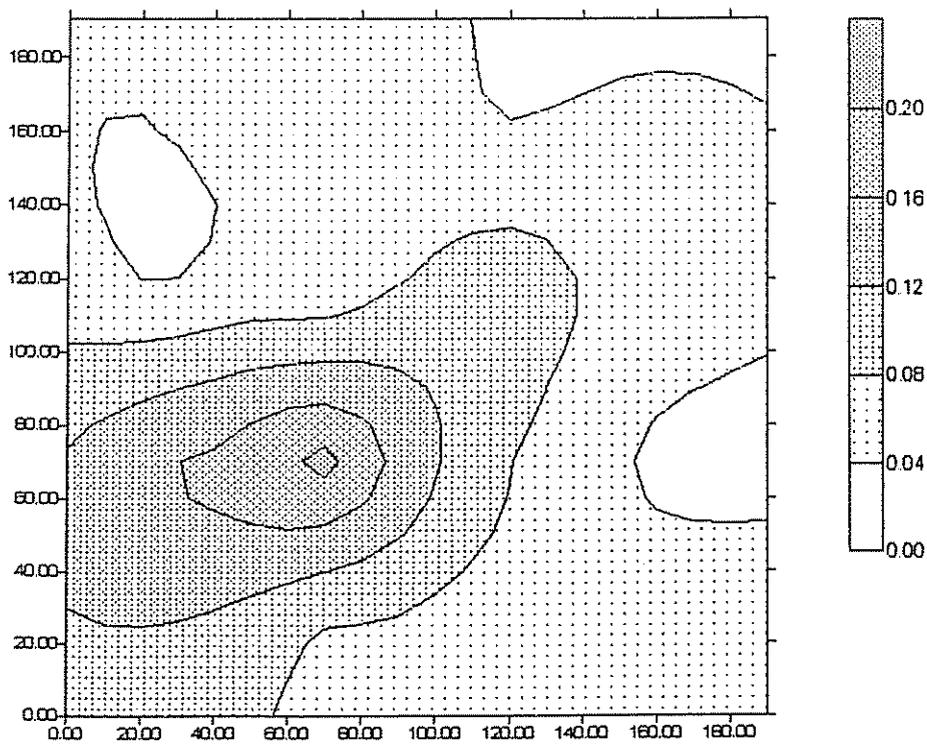


PARCELA DE 5 AÑOS DE EDAD, 10-20 cm

DRL Cafe

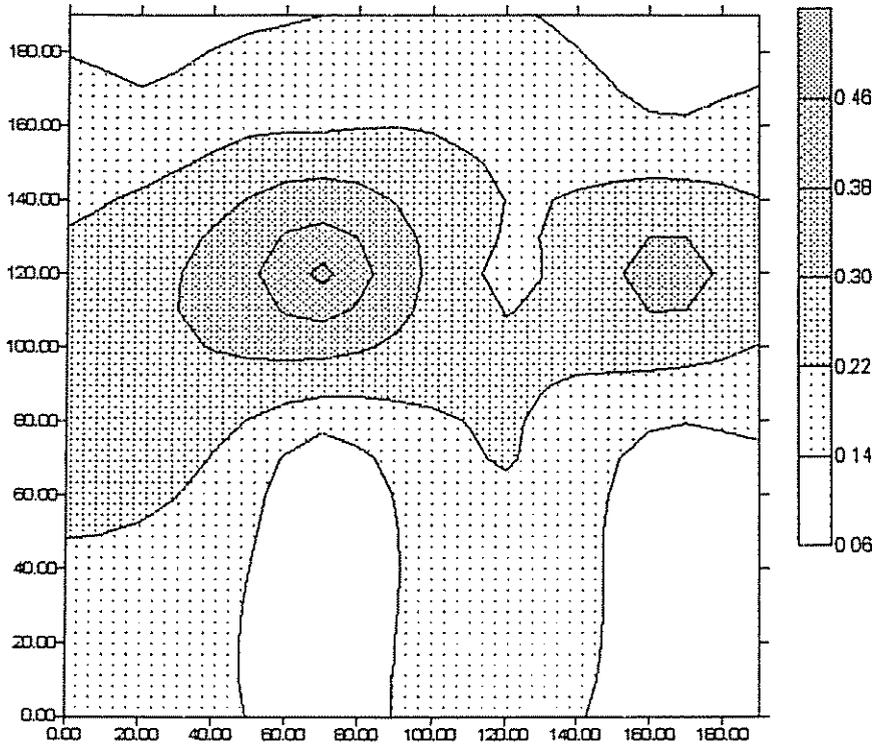


DRL Eucalipto

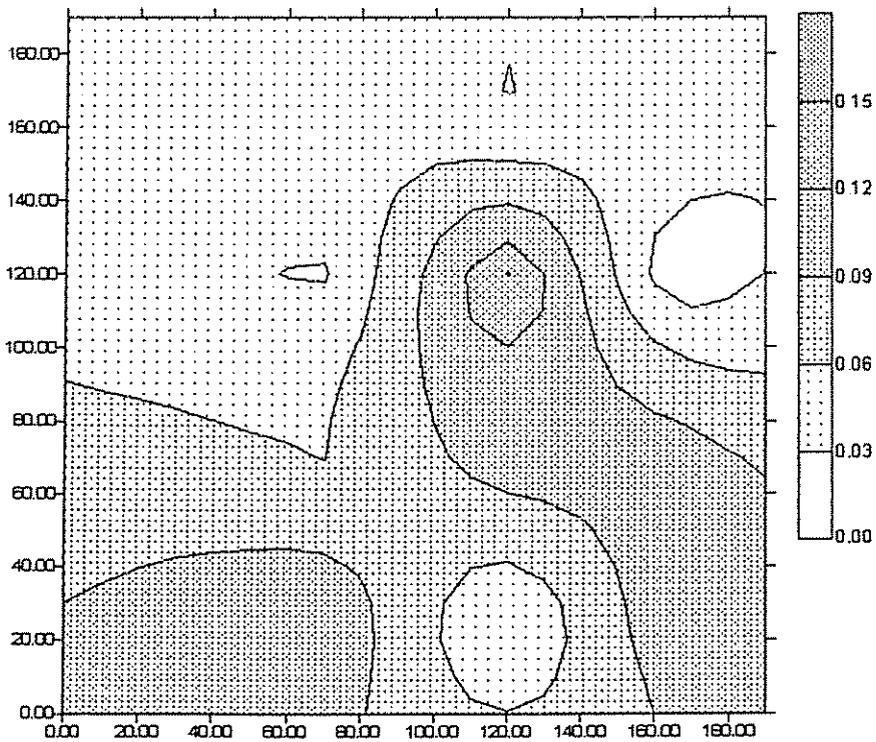


PARCELA DE 5 AÑOS DE EDAD, 30-40 cm

DRL Cafe

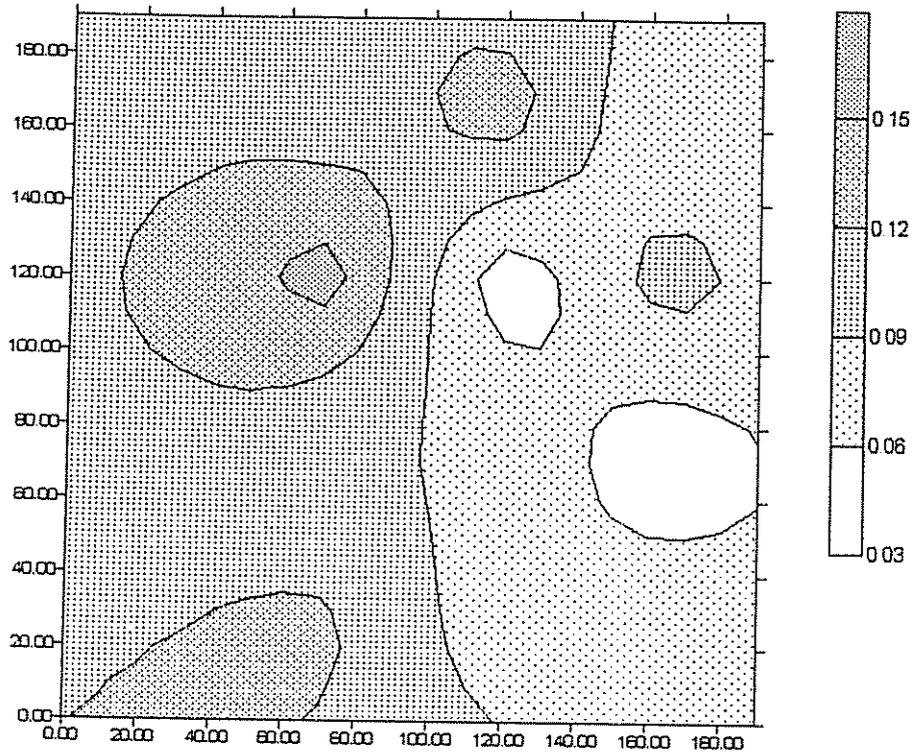


DRL Eucalipto

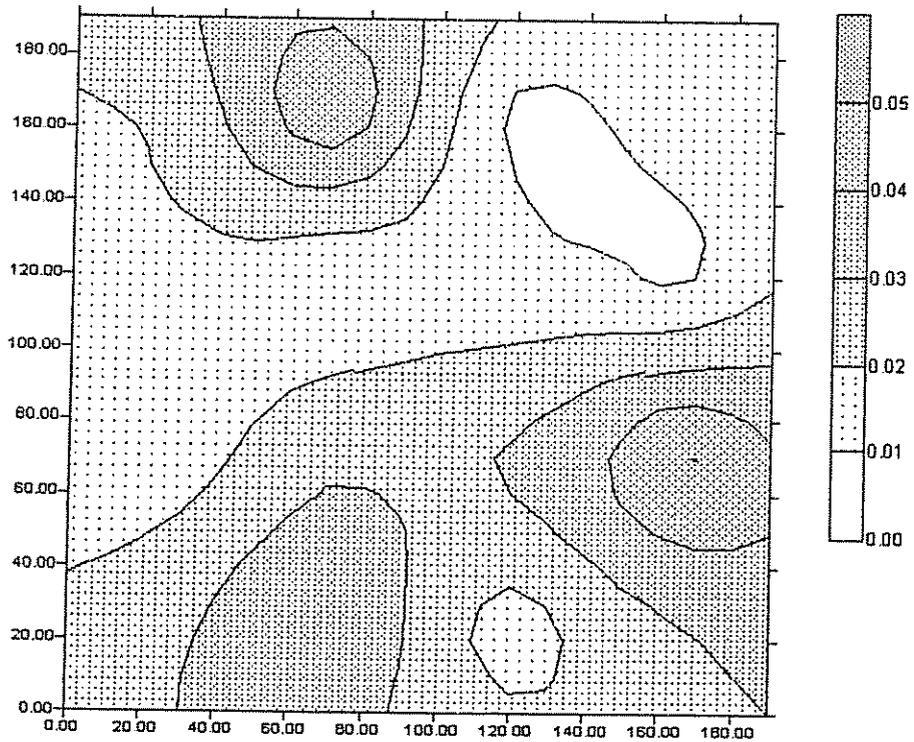


PARCELA DE 5 AÑOS DE EDAD, 40-60 cm

DRL Cafe

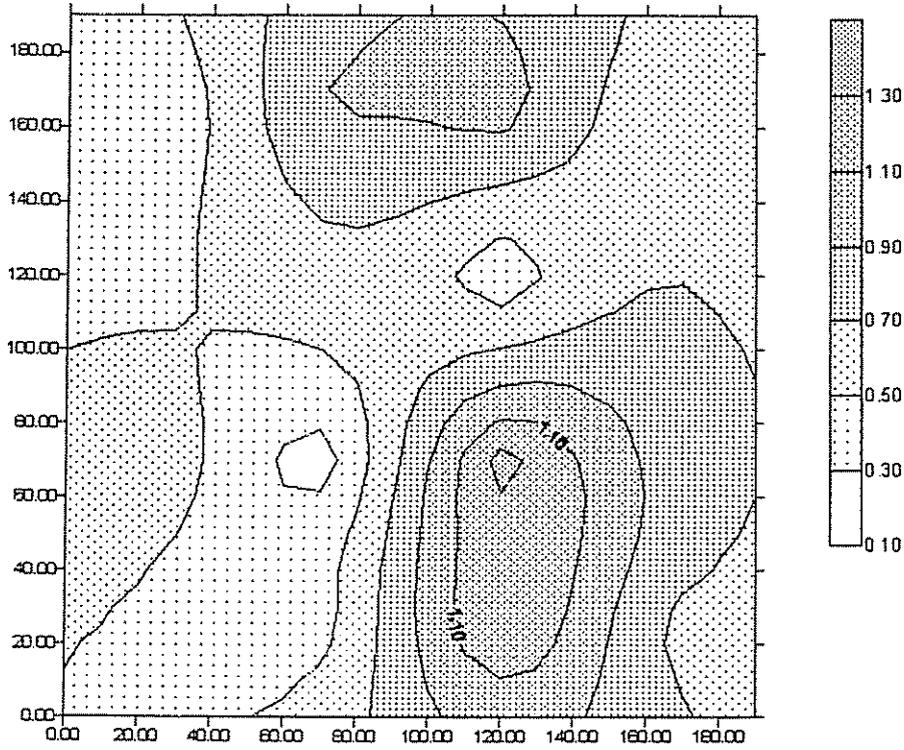


DRL Eucalipto

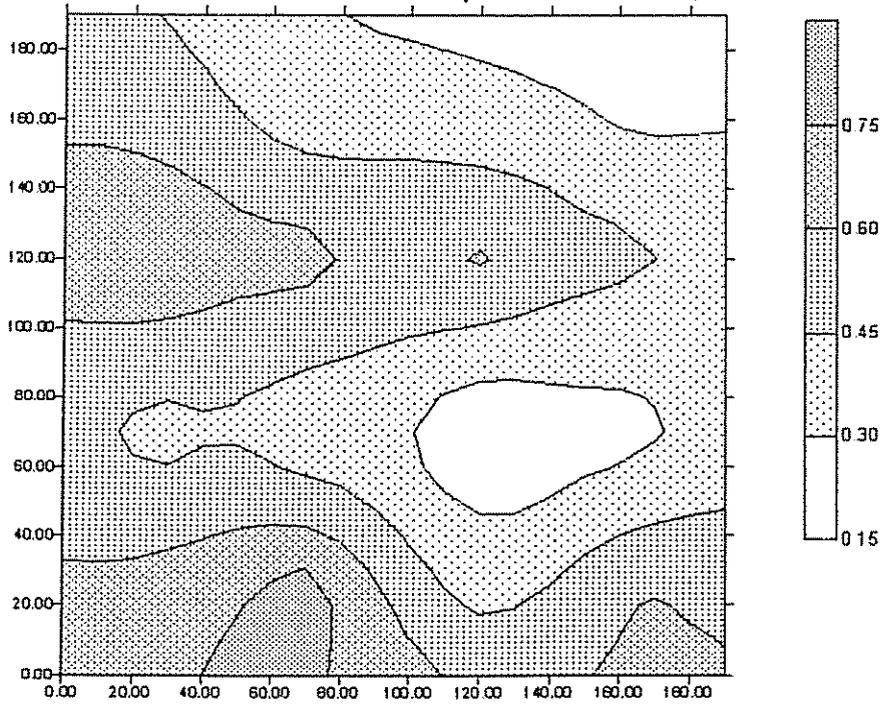


PARCELA DE 6 AÑOS DE EDAD, 0-10 cm

DRL Cafe

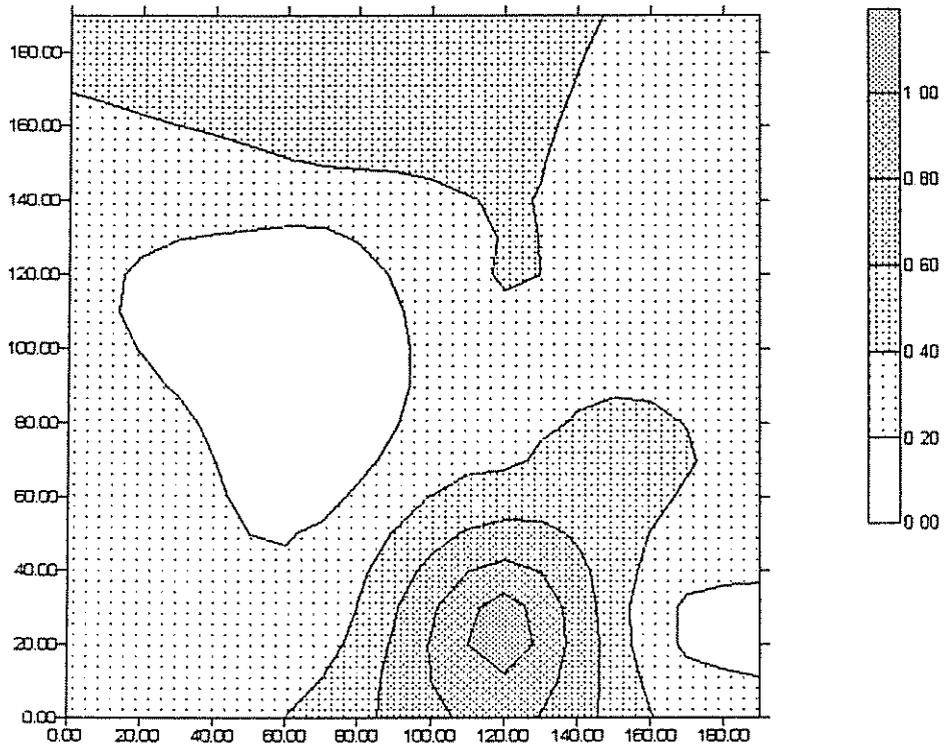


DRL Eucalipto

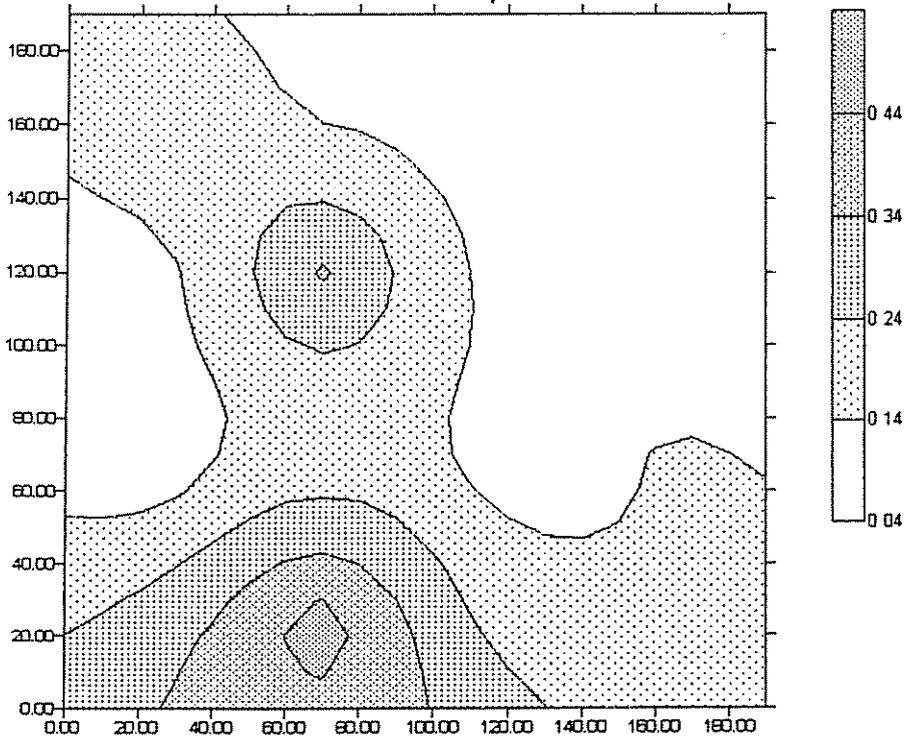


PARCELA DE 6 AÑOS DE EDAD, 10-20 cm

DRL Cafe

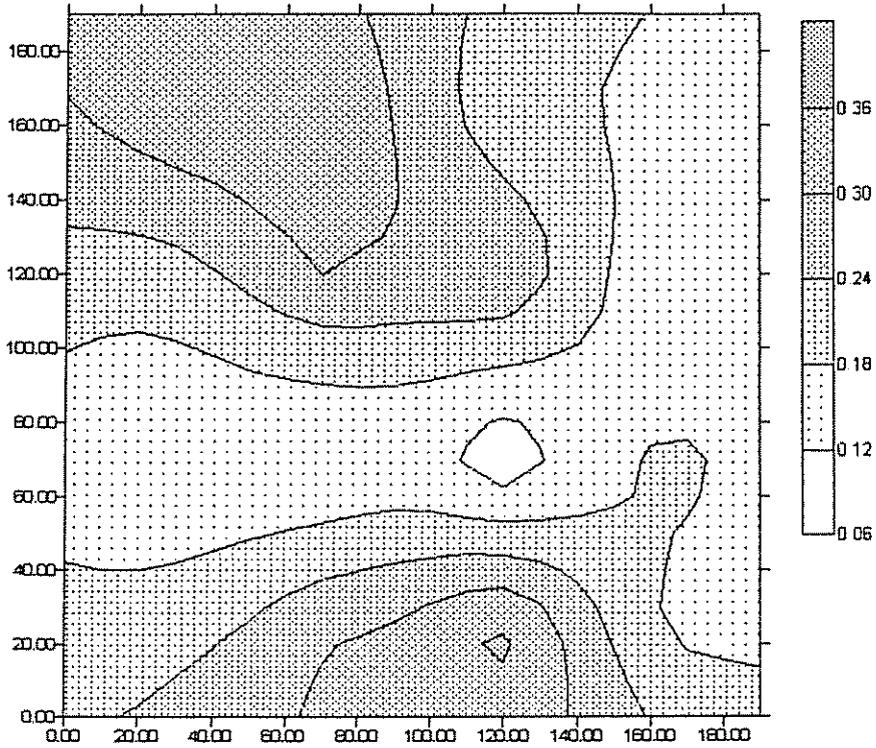


DRL Eucalipto

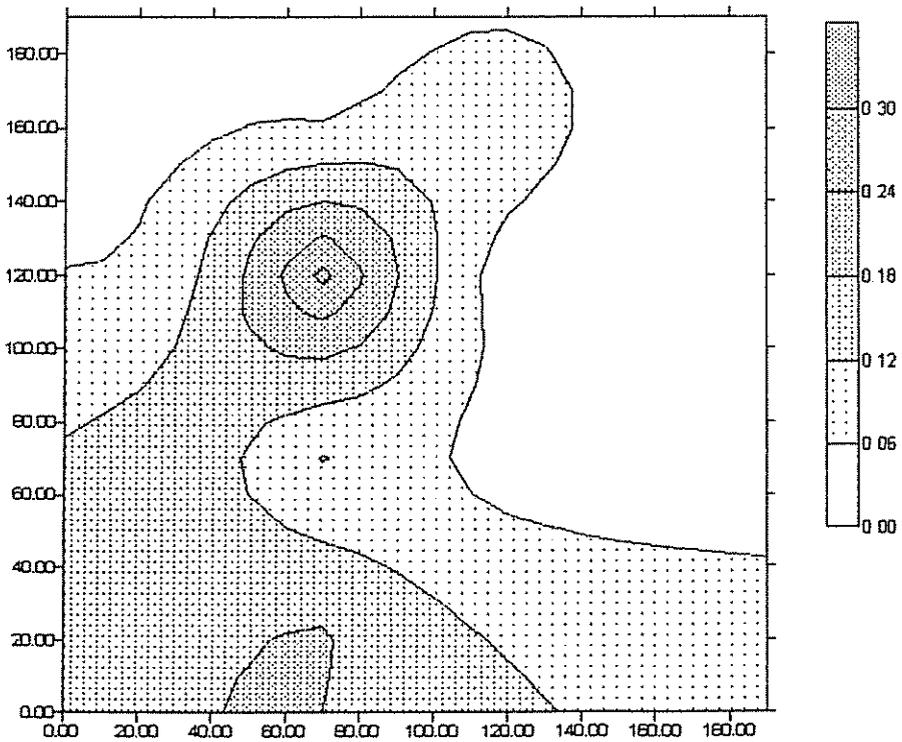


PARCELA DE 6 AÑOS DE EDAD, 20-30 cm

DRL Cafe

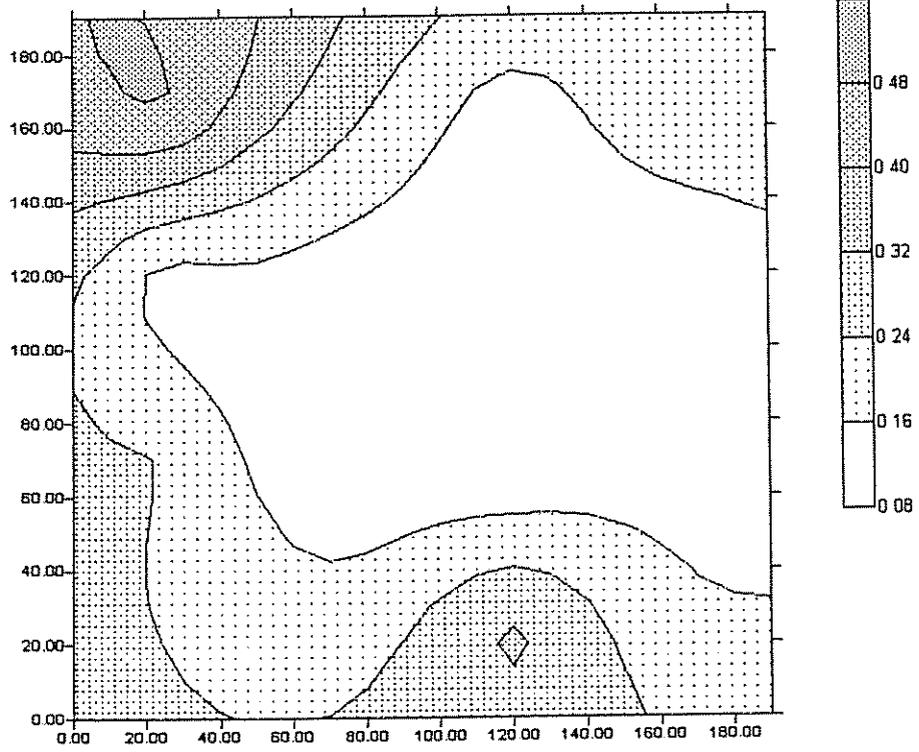


DRL Eucalipto

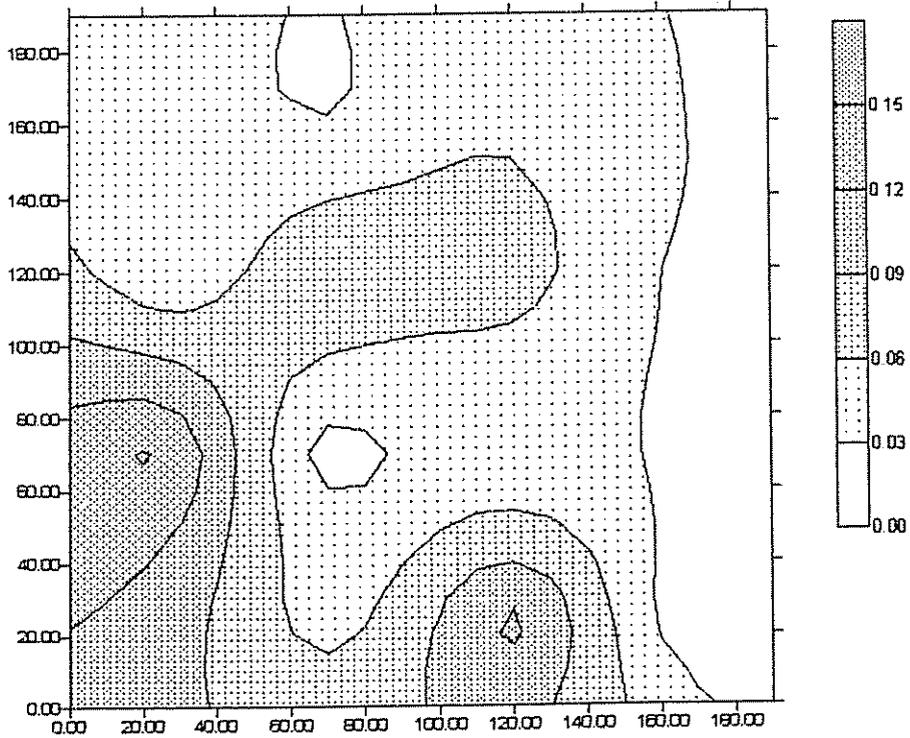


PARCELA DE 6 AÑOS DE EDAD, 30-40 cm

DRL Cafe

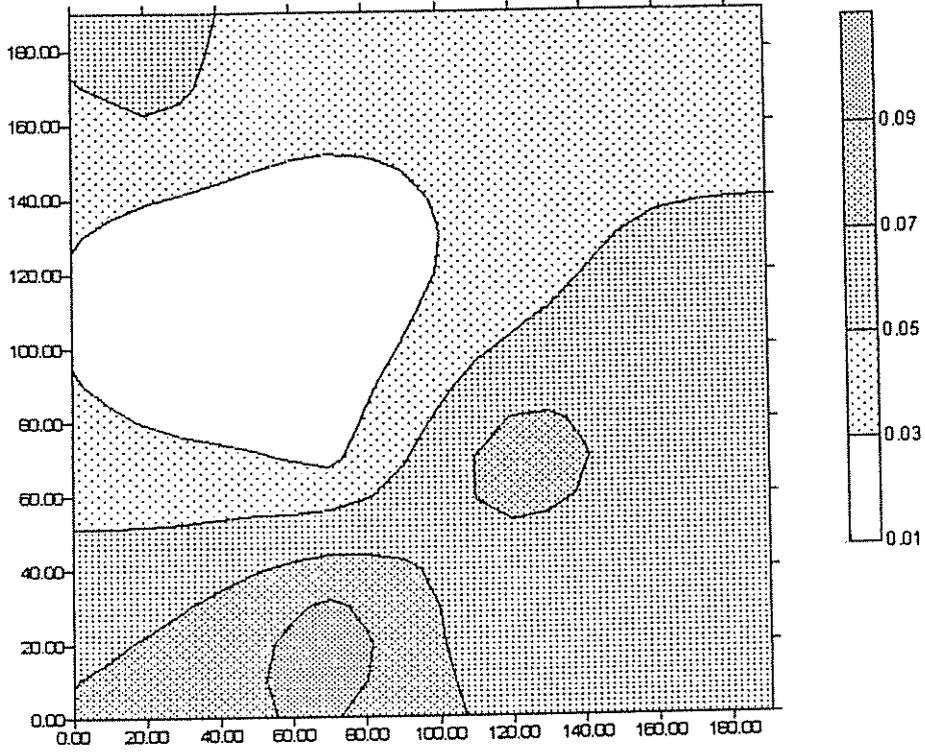


DRL Eucalipto

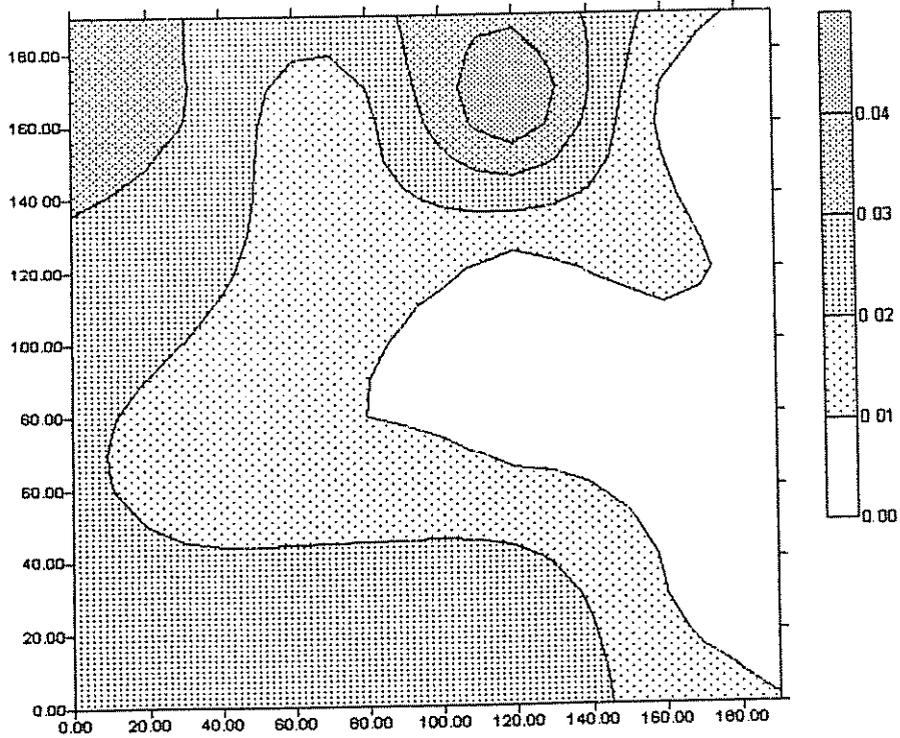


PARCELA DE 6 AÑOS DE EDAD, 40-60 cm

DRL Cafe

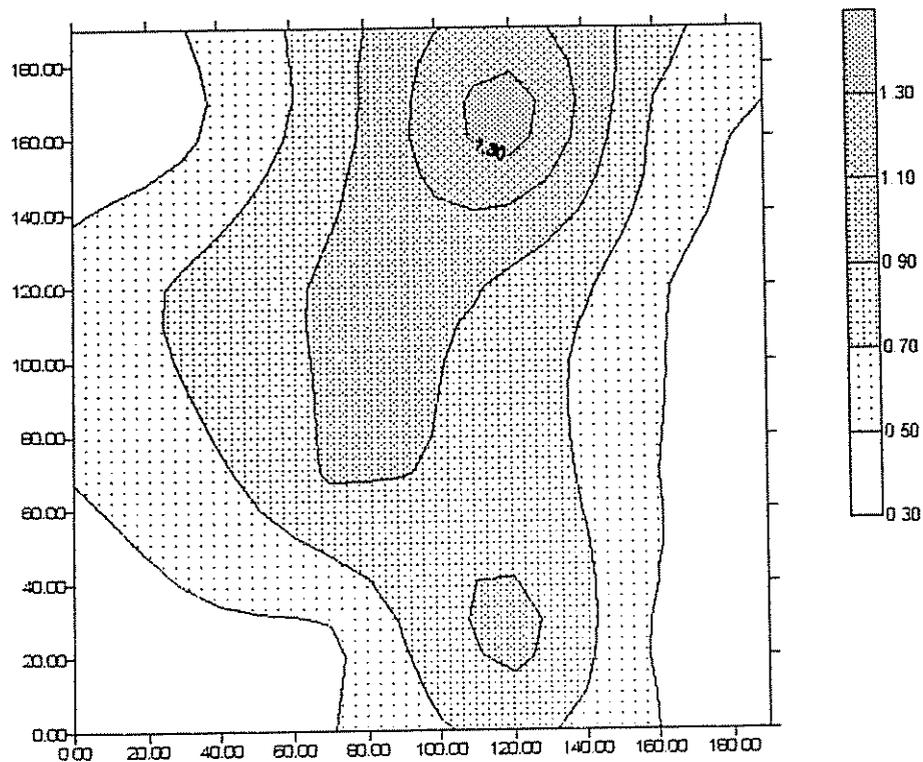


DRL Eucalipto

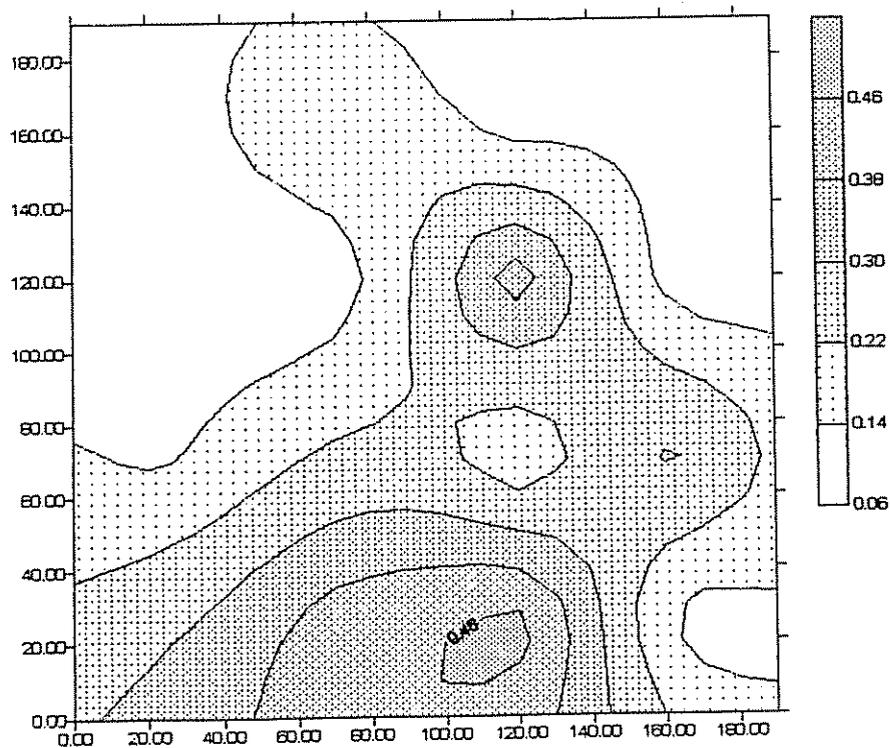


PARCELA DE 7 AÑOS DE EDAD, 0-10 cm

DRL Cafe

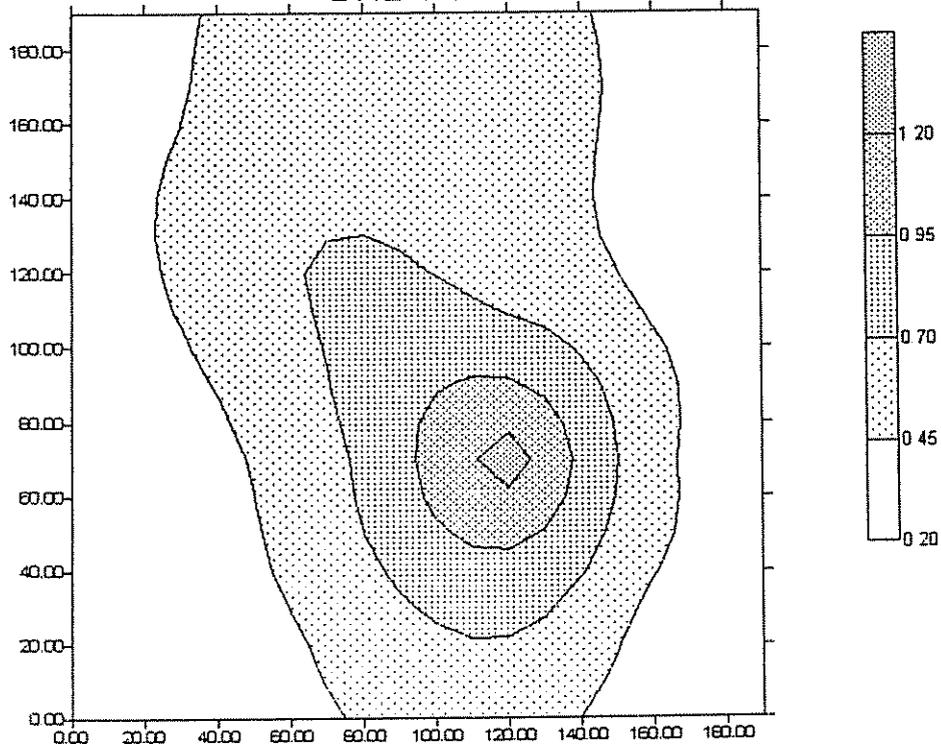


DRL Eucalipto

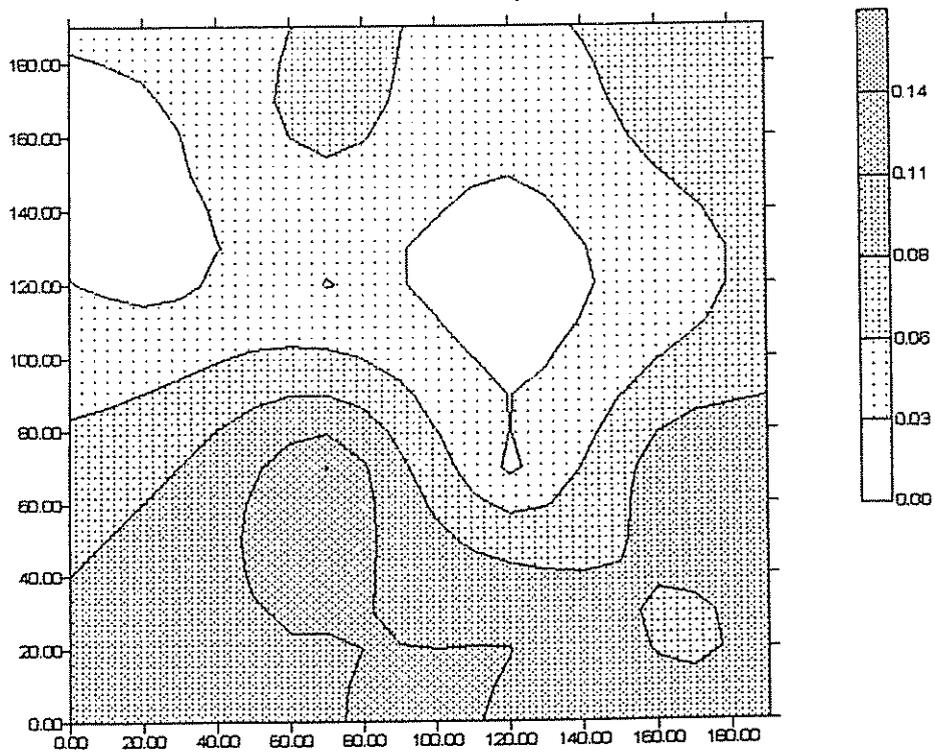


PARCELA DE 7 AÑOS DE EDAD, 10-20 cm

DRL Cafe

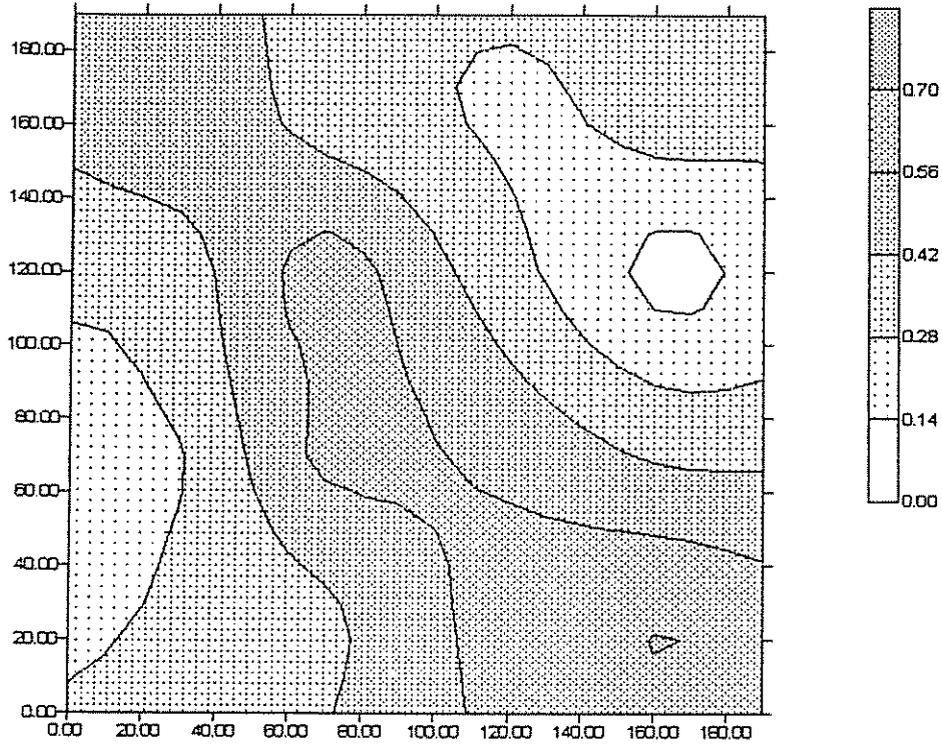


DRL Eucalipto

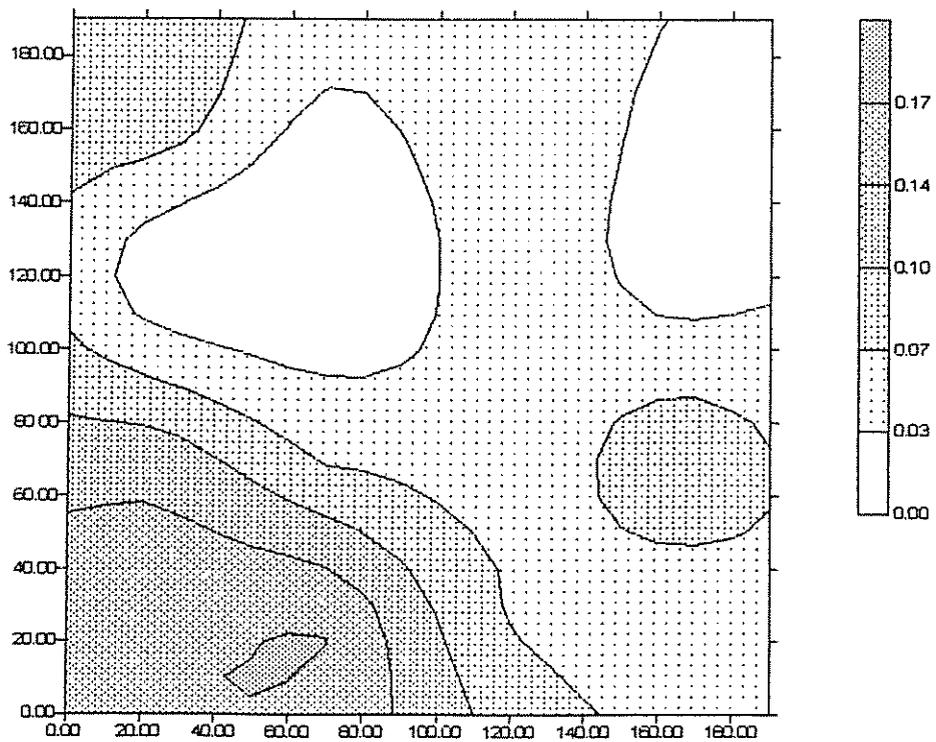


PARCELA DE 7 AÑOS DE EDAD, 20-30 cm

DRL Cafe

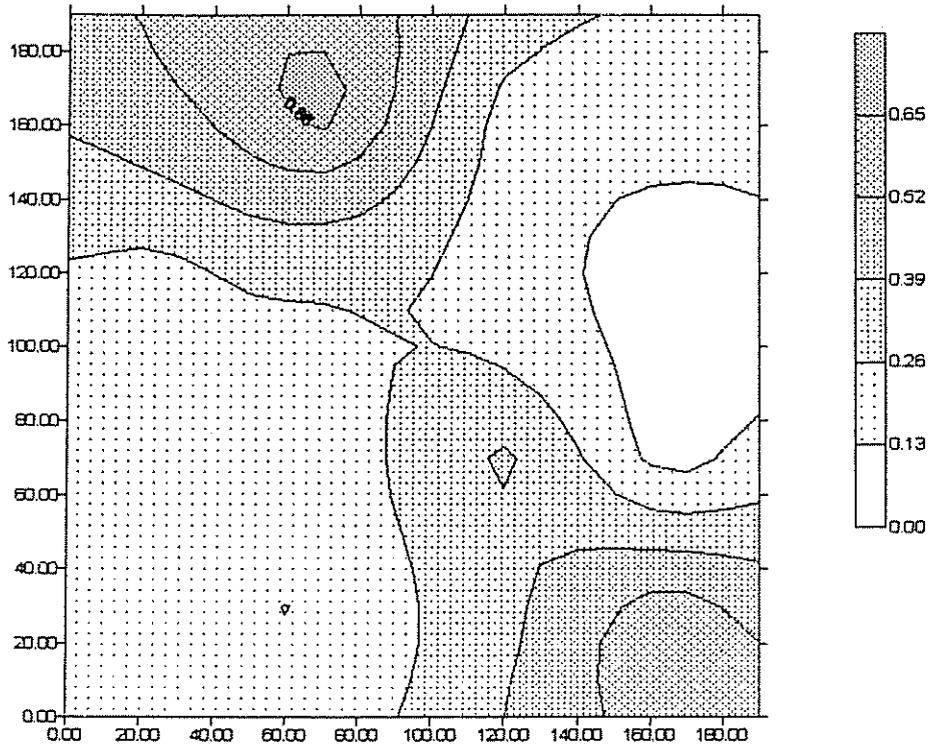


DRL Eucalipto

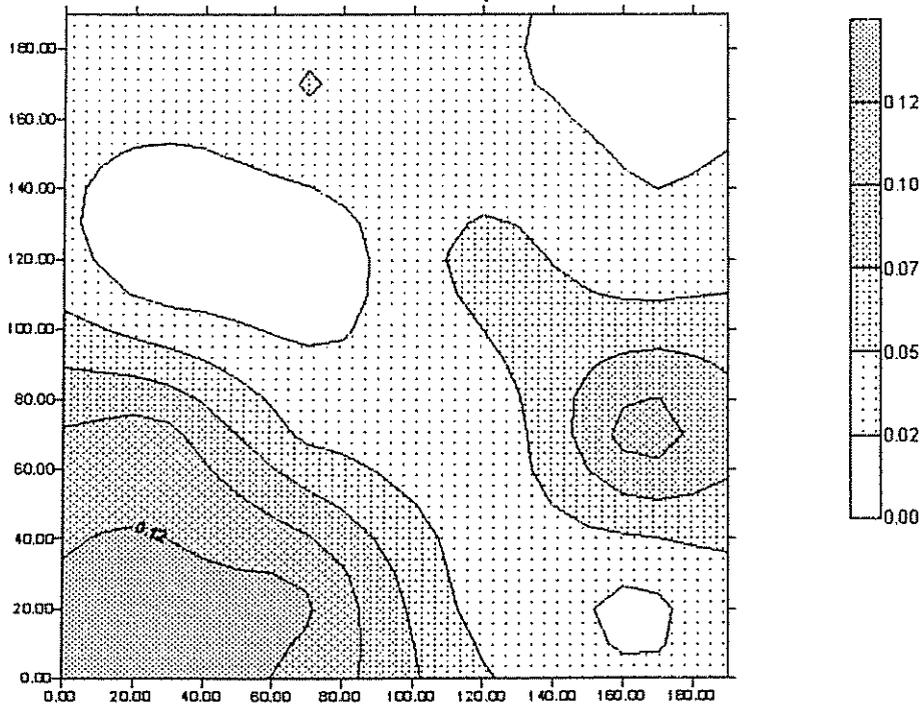


PARCELA DE 7 AÑOS DE EDAD, 30-40 cm

DRL Cafe

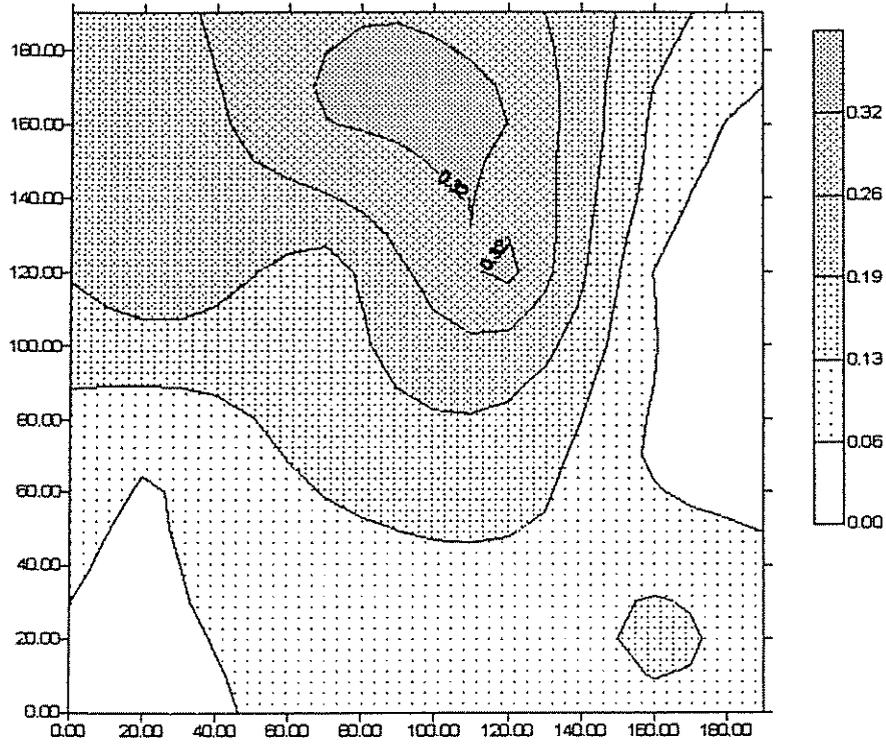


DRL Eucalipto

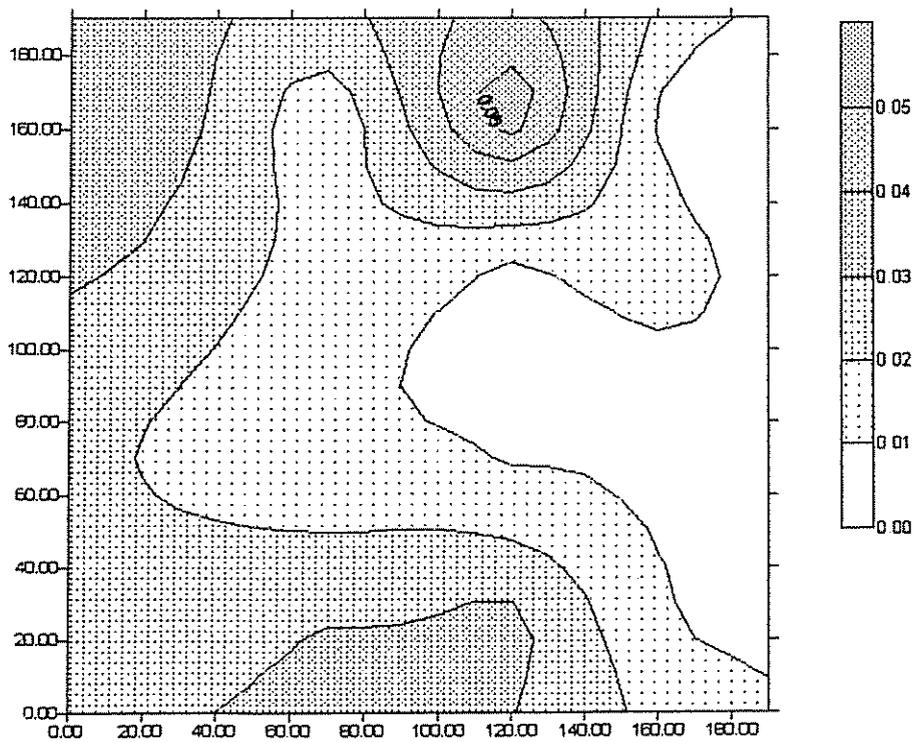


PARCELA DE 7 AÑOS DE EDAD, 40-60 cm

DRL Cafe



DRL Eucalipto



ANEXO E. ANALISIS DE FRACTALES PARA MUESTRAS DE RAICES LEÑOSAS

Objetivo: Caracterizar el grado de intrincamiento/complejidad de ramificaciones del sistema radicular de *E. deglupta* y probar si existen diferencias en los patrones de ramificación a diferentes distancias del árbol.

Pasos:

- a) Estimar el valor de la dimensión de fractal D , mediante el análisis computarizado de 9 muestras de raíces leñosas, (ejemplos de imágenes de raíces leñosas a diferentes escalas en figuras E.3 y E.4)
- b) Realizar un análisis de covarianza por muestras, con datos combinados y con la aplicación de variables artificiales como cambiadores de intercepto y pendiente de un modelo combinado.

Metodología

El análisis de fractales en este trabajo tiene como objetivo caracterizar el grado de intrincamiento de las raíces de *E. deglupta*. Para ello se estima un coeficiente D que varía entre 1 y 2, el cual refleja la abundancia y la complejidad de las ramificaciones de la raíz del eucalipto; mientras más se acerca el valor de D a 1, la estructura de la raíz del eucalipto será poco compleja, en cambio si se aproxima a 2, más compleja e intrincada es la forma de la raíz y mayor es la abundancia de ramificaciones que tiene esta raíz (Lorimer *et al.*, 1994; Tatsumi *et al.*, 1989).

Si el valor del coeficiente D varía entre diferentes muestras, tomadas al azar de diferentes lugares, significa que el ambiente influye en el grado de complejidad y en la abundancia de ramificaciones de la raíz del eucalipto. Si el valor de este coeficiente es constante independientemente del lugar, se asume que existe una alta probabilidad de que la forma del sistema ramificado de la raíz esté sujeta en mayor medida a una regulación genética que a factores del ambiente. Se escogieron tres sitios para la toma de muestras (figura 3.2) de manera de poder probar la hipótesis nula de que el valor de D es diferente para cada grupo de muestras. Para el efecto, se utilizó una adaptación de la metodología propuesta por Tatsumi *et al.*, (1989). Según esta metodología es posible estimar el parámetro D a través del procesamiento digital y cambios de escalamiento de imágenes adquiridas del mundo natural mediante algún dispositivo electrónico que permita convertir imágenes reales al formato de cuadrícula (raster). En este caso, el interfase utilizado fue un scanner. Las 9 muestras de raíces leñosas fueron previamente

colocadas cuidadosamente entre hojas de papel, de manera de que las raíces conservaran tanto como sea posible su forma original, luego fueron puestas a secar al ambiente entre hojas de papel absorbente (periódico), y luego prensadas durante una semana, de manera similar a como se elabora un herbario.

Las muestras secas fueron “scaneadas” obteniéndose imágenes de 240 dpi (puntos por pulgada), de esta forma cada punto en las imágenes midió 0.1058 mm. Estas imágenes iniciales fueron exportadas al paquete IDRISI for Windows, Versión 1.0.003, el cuál se utiliza como sistema de información geográfica, pero por sus capacidades en el procesamiento de imágenes digitales, fue utilizado como herramienta para este trabajo. Las imágenes iniciales fueron reclasificadas en IDRISI, con la opción RECLASS para obtener solamente dos tonalidades de grises. Posteriormente, se procedió a cambiar las escalas de las imágenes mediante el comando CONTRACT , opción “pixel aggregation” y luego el comando RECLASS; de esta forma, se aseguró que no existiría pérdida de información relevante. Por último, se corrió el comando HISTO para conocer el número de píxeles cubiertos por las imágenes. Las escalas utilizadas fueron 1, 4, 16 y 64 veces el valor de un píxel definido al inicio de 0.1058 mm de lado. Por lo tanto, para cada muestra se obtuvieron cuatro pares de datos dando un total de 36 pares de datos. Con estos datos, se realizó una regresión para cada muestra y para todos los datos combinados de acuerdo al siguiente modelo:

$$\log(N(r)) = \log K + D \cdot \log(r) + e$$

Donde $\log(N(r))$ es el logaritmo del número de píxeles cubierto por la imagen de la raíz, $\log(r)$ es el logaritmo del factor de escalamiento de la imagen, $\log K$ y D son el intercepto y la pendiente del modelo y e es el error aleatorio. Las regresiones se efectuaron con la opción PROC REG del SAS. Posteriormente, se realizó un análisis de covarianza para probar la hipótesis de que no existe diferencia en el parámetro D tomando en consideración el sitio de donde fueron tomadas las muestras; es decir entre la calle del eucalipto, después de una hilera de café y después de dos hileras. Las bases estadístico matemáticas del análisis de covarianza, así como los procedimientos que emplea este análisis están documentados detalladamente (ver por ejemplo, Johnson *et al.*, 1987; Krasker *et al.*, 1983; Levin y Rubin 1996; Maddala, 1994); por

este motivo acá no serán explicados conceptos como cambiadores de intercepto, cambiadores de pendiente y omisión de variables.

Para este análisis, se crearon dos tipos de variables artificiales: los cambiadores del intercepto y los cambiadores de la pendiente. El modelo estadístico que incorpora los cambiadores de intercepto es:

$$\log(N(r)) = \log K + D \cdot \log(r) + d_1 D_1 + d_2 D_2 + e$$

Donde: D1 y D2 son las variables artificiales que toman en cuenta los sitios después de una hilera y después de dos hileras de café respectivamente, la variable artificial D3 asociada al sitio de la calle del eucalipto fue omitida, por las restricciones del análisis de covarianza.

El modelo que incorpora los cambiadores de la pendiente tiene la siguiente formulación estadística:

$$\log(N(r)) = \log K + D \cdot \log(r) + z_1 Z_1 + z_2 Z_2 + e$$

Donde: Z1 y Z2 son las variables artificiales asociadas a los sitios después de una hilera y después de dos hileras de café; nuevamente la variable Z3 ha sido omitida en el modelo. El análisis de covarianza servirá para probar la significación de las regresiones y de las variables artificiales, tomando también en cuenta los valores de R^2 . Si se dan casos donde las variables artificiales son significativas, no se podrá rechazar la hipótesis nula de que los sitios modifican los patrones morfológicos de la raíz del eucalipto.

Resultados:

El cuadro E.1 muestra que el valor de R cuadrado en todos los casos indica un ajuste casi perfecto de los datos, todos los estimadores son altamente significativos. Por lo tanto, se puede concluir que no existen diferencias en los patrones de ramificación de la raíz del eucalipto en ninguna de las tres distancias probadas. Esto se puede interpretar como un dominio de la influencia de las condiciones ambientales del suelo sobre la información genética en lo que

respecta a los patrones de ramificación, asumiendo que los diferentes tipos de raíces deberían expresar diferentes formas de ramificación.

La dimensión de fractal D expresa el grado de intrincamiento de la ramificación de una raíz en términos de una dimensión fraccionada, una raíz sin ramificaciones tenderá a parecerse a una línea de dimensión 1, mientras que una raíz altamente ramificada tenderá a cubrir todo el plano y su dimensión tenderá a 2. La dimensión de fractal promedio que se obtuvo en las muestras es de 1.64 (D del modelo combinado en el cuadro E.1), ésta cambia muy poco cuando se incorporan las covariables de ubicación como cambiadores de pendiente e intercepto (figuras E.1 y E.2). El valor estable para D encontrado indica que las muestras examinadas presentan una auto similaridad en el rango de 0.1 a 6.8 milímetros en que fue realizado el análisis, lo cuál muestra una tendencia a presentar los mismos patrones de ramificación independientemente de la escala en el rango de 0.1 a 6.8 milímetros.

Cuadro E.1. Analisis de covarianza con datos separados y combinados para la dimensión de fractal D estimada en muestras de raices leñosas

Regresiones	Treat.*	n	R cuadr.	Intercepto	Dimension fractal (D)	VA. 1hil. café **	VA. 2hil. café
Muestra 1	B	4	0.9956	8.0041	-1.6320		
Muestra 2	B	4	0.9948	8.1781	-1.5981		
Muestra 3	C	4	0.9943	8.2422	-1.6457		
Muestra 4	A	4	0.9954	8.7907	-1.5929		
Muestra 5	A	4	0.9944	8.3182	-1.6268		
Muestra 6	C	4	0.9943	8.1644	-1.5975		
Muestra 7	A	4	0.9972	8.5445	-1.6489		
Muestra 8	B	4	0.9968	8.9224	-1.6773		
Muestra 9	B	4	0.9964	8.9935	-1.6855		
Muestra 10	C	4	0.9975	9.4840	-1.7351		
Combinada		40	0.9652	8.5642	-1.6440		
Comb. C/CI***		40	0.9634	8.5476	-1.6440	-0.0224	0.0852
Comb. C/CP		40	0.9636	8.5642	-1.6220	-0.0235	-0.0420

* A=Hilera del eucalipto; B=Después de una hilera de café; C=Después de dos hileras de café

** VA=Variable Artificial

*** CI=Cambiador de Intercepto; CP=Cambiador de Pendiente

Figura E.1 Variación de la dimensión de fractal D con los cambiadores de pendiente para tres ubicaciones de raíces leñosas

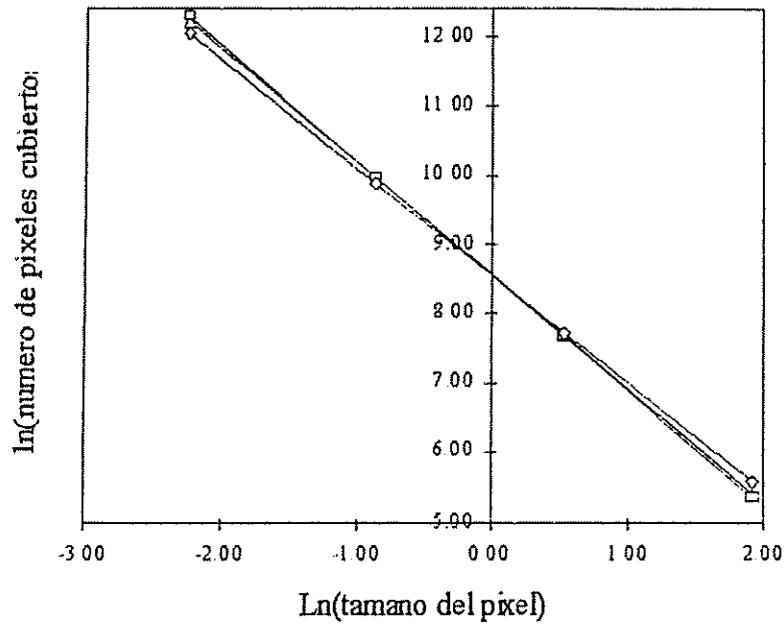


Figura E.2 Variación de la dimensión de fractal D con los cambiadores de intercepto para tres ubicaciones de raíces leñosas

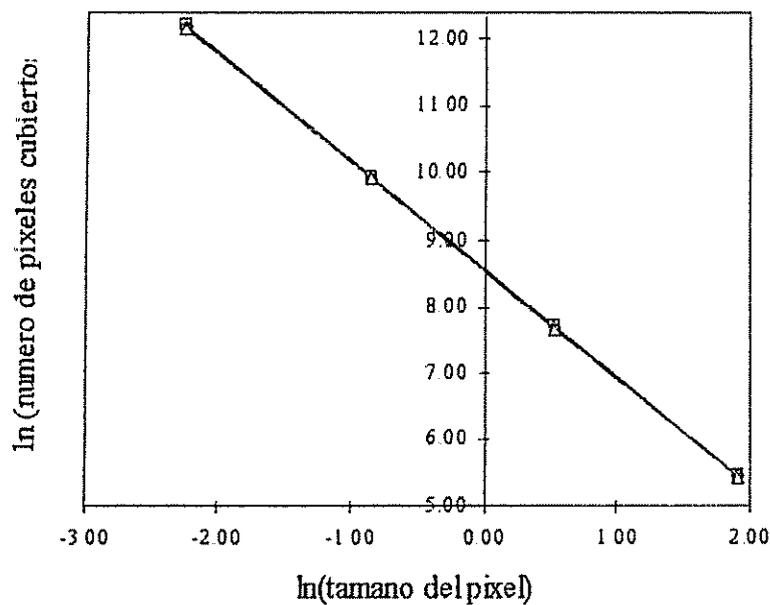


Figura E.3 Muestra No. 04 con un tamaño de pixel de 0.1058 mm

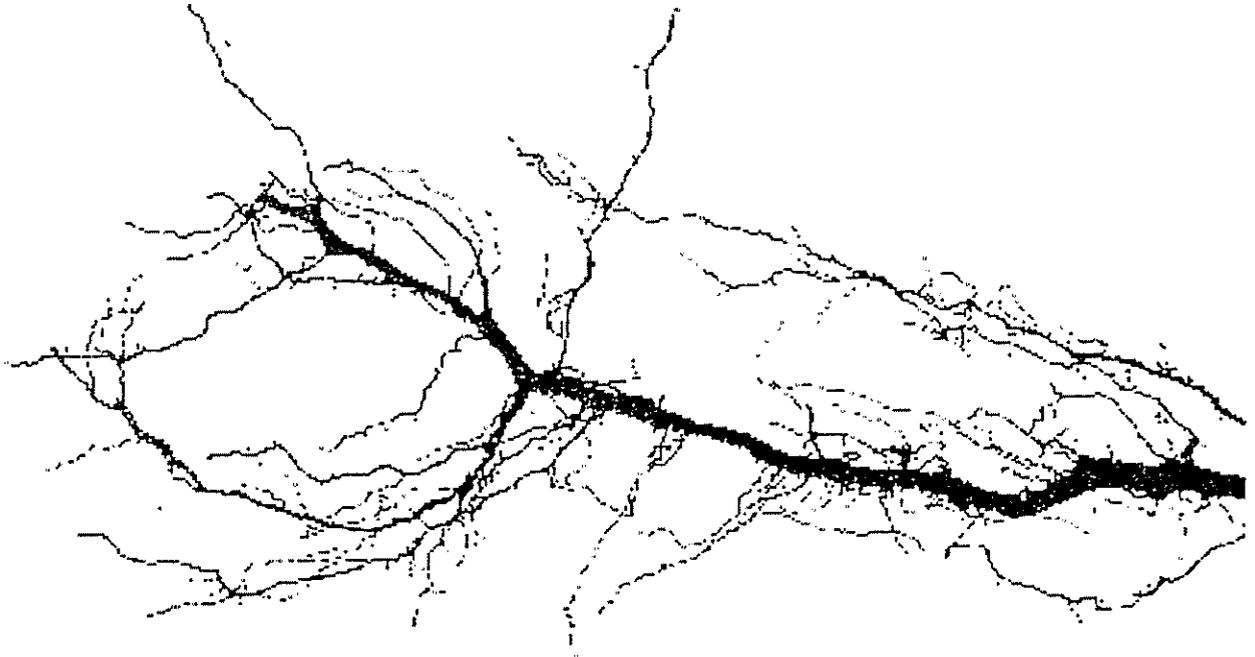


Figura E.4 Muestra No. 04 con un tamaño de pixel de 6.7712 mm

