CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y

ENSEÑANZA (CATIE)

PROGRAMA DE ENSEÑANZA

AREA DE POSTGRADO

DINAMICA DE RAICES FINAS EN LOS SISTEMAS AGROFORESTALES DE CACAO CON SOMBRAS DE PORO O LAUREL EN TURRIALBA, COSTA RICA

Tesis sometida a la consideración del Comité Técnico de Postgrado y Capacitación del Programa de Enseñanza en Ciencias Agrícolas y Recursos Naturales del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, para optar al título de

Magister Scientiae

por

FERNANDO MUÑOZ ARBOLEDA

Turrialba, Costa Rica

1993

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:

MAGISTER SCIENTIAE

FIRMANTES:

John W. Beer Ph.D.
Profesor Consejero

Lawrence T. Szott Ph.D
Miembro Comité Asesor

Assefaw Tewolde Ph.D.
Miembro Comité Asesor

Donald D. Kass Ph.D.
Miembro Comité Asesor

Assefaw Tewolde Ph.D.
Jefe Area de Postgrado

Ramón Lastra Ph.D.
Director, Programa de Enseñanza

Fernando Muñoz Arboleda
Candidato

D E D I C A T O R I A

A mi esposa Luz Marina

A mi hijo José Fernando

A mi madre Marina

A mi padre José Ovidio y

A mi tía Nubia

Todos ellos contribuyeron con
su esfuerzo para que alcanzara
esta meta.

A G R A D E C I M I E N T O S

Al Dr. John Beer, Profesor Consejero, por su amistad, su gran apoyo, guía y tiempo dedicado.

Al Dr. Lawrence Szott, miembro del Comité Asesor, por su amistad, apoyo y aporte de sus conocimientos en el tema.

Al Dr. Donald Kass, miembro del Comité Asesor, por su amistad y colaboración.

Al Dr. Assefaw Tewolde, miembro del Comité Asesor, por su amistad y apoyo en la parte estadística.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, por haberme brindado la oportunidad de realizar mi maestría.

Al gobierno de Holanda, por proveer los fondos de la beca sin la cual no me hubiera sido posible realizar esta maestría.

Al Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ, por el apoyo logístico y financiero con los cuales fue posible realizar este trabajo. Así como, a Jorge Alvarez, Margarita y Grace por su ayuda y amistad.

Al señor Jesús Brenes, por su gran voluntad, amistad y excelente ayuda en el trabajo de campo.

A los trabajadores de campo del Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ, por su amistad y gran ayuda.

A los "muchachos" del laboratorio de suelos, por su amistad y ayuda siempre oportuna.

A los amigos del Centro de Computo, por su asesoría en los análisis estadísticos.

A los paisanos colombianos y a sus respectivas familias: Carlos Arturo y Patricia, Diómedes y Julia, Elkin y Edith, Jorge Fdo. y Aura, Mauricio y Rocío, por haberse constituido en una gran familia con la cual compartimos grandes alegrías.

A todos los amigos de la promoción 91-93 con quienes compartí gratos momentos y de quienes guardo gratos recuerdos.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
INDICE DE CONTENIDO	v
RESUMEN	viii
SUMMARY	x
INDICE DE CUADROS	xii
INDICE DE FIGURAS	xiii
1 INTRODUCCION	1
2 REVISION DE LITERATURA	3
2.1 Importancia del estudio de raíces finas	3
2.2 Producción de raíces finas	3
2.3 Descomposición de raíces finas	4
2.4 Trabajos anteriores relacionados con el estudio	4
2.4.1 Cacao	4
2.4.2 Poró y laurel	6
2.4.3 Estudios realizados en el sitio	7
2.5 Métodos para el estudio de raíces	9
3 MATERIALES Y METODOS	12
3.1 Localización y características ambientales del sitio	12
3.2 Diseño experimental	12
3.3 Manejo agronómico de las parcelas	12
3.4 Muestreo	13
3.5 Variables estudiadas y métodos usados	14

4 BIOMASA, PRODUCCION Y TASAS DE RENOVACION DE RAICES FINAS 16

4.1 INTRODUCCION 16

4.2 MATERIALES Y METODOS 18

4.2.1 Tipo y número de muestras 18

4.2.2 Biomasa total de raíces finas 19

4.2.3 Tasas de producción de raíces finas 21

4.2.4 Tasas de renovación de raíces finas 23

4.3 ANALISIS ESTADISTICO 24

4.3.1 Biomasa total de raíces finas 24

4.3.2 Tasas de producción de raíces finas 24

4.4 RESULTADOS Y DISCUSION 25

4.4.1 Biomasa total de raíces finas 25

4.4.2 Tasas de producción de raíces finas 28

4.4.3 Tasas de renovación de raíces finas 32

4.4.3.1 Período seco 33

4.4.3.2 Período húmedo 33

4.4.3.3 Tasa anual de renovación de raíces finas 34

4.4.4 Aporte anual de nutrimentos a partir de la renovación de raíces finas *vs* aporte anual de nutrimentos a partir de la hojarasca 35

4.4 CONCLUSIONES GENERALES 39

5 DESCOMPOSICION DE LAS RAICES FINAS Y LIBERACION DE NUTRIMENTOS 42

5.1 INTRODUCCION 42

5.2 MATERIALES Y METODOS 44

5.2.1 Tipo de muestras 44

5.2.2 Distribución de las muestras en espacio y tiempo 45

5.2.3 Análisis del contenido de nutrimentos 46

5.2.4 Análisis estadístico 47

5.3 RESULTADOS Y DISCUSION 49

5.3.1 Pérdida de peso de las raíces finas por descomposición 49

5.3.2 Liberación de Nitrógeno 54

5.3.3 Liberación de Fósforo 58

5.3.4 Liberación de Potasio 62

5.3.5 Liberación de Calcio 63

5.3.6 Liberación de Magnesio 66

5.4 CONCLUSIONES GENERALES 70

6 BIBLIOGRAFIA 72

ANEXO DE CUADROS

MUÑOZ ARBOLEDA, F. 1993. Dinámica de raíces finas en los sistemas agroforestales de cacao con sombras de poró o laurel en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 78 p.

Palabras clave: biomasa, Ca, *Cordia alliodora*, descomposición, *Erythrina poeppigiana*, K, liberación de nutrimentos, Mg, N, P, renovación de raíces finas, sistemas agroforestales, *Theobroma cacao*.

R E S U M E N

Se estudió la biomasa total de raíces finas (BTRF), las tasas de producción de raíces finas (TPRF), descomposición y liberación de nutrimentos a partir de las raíces finas (diámetro < 2 mm) en parcelas de cacao (*Theobroma cacao*), sembrados hace 15 años, sombreados por poró (*Erythrina poeppigiana)* o laurel (*Cordia alliodora*).

Se observó estabilidad de la BTRF, excepto en el sistema cacao/laurel al inicio de las lluvias , cuando se observó un aumento significativo de su BTRF. La BTRF del sistema cacao/laurel osciló entre 1000 y 1847 kg ha^{-1} y en cacao/poró entre 925 y 1198 kg ha^{-1} (pesos secos al horno).

Se observaron bajas TPRF de cacao en octubre (alta precipitación), diciembre (después de la poda de cacao) y marzo (período seco) pero al reinicio de las lluvias (mayo) tuvo un aumento significativo. En laurel y poró, la TPRF máxima ocurrió en octubre (alta precipitación) y la mínima en marzo (período seco). El laurel mostró mayores TPRF que el poró en octubre y diciembre.

Las tasas de renovación de raíces finas (TRRF) durante los cuatro meses de la época seca fueron de 0.07 y 0.16 en los sistemas cacao/laurel y cacao/poró, respectivamente. En los cuatro meses estudiados de la época húmeda fueron 0.46 y 0.34 en los mismos sistemas, respectivamente. Las TRRF anuales estimadas con base en estas cifras, para los sistemas cacao/laurel y cacao/poró fueron 0.99 y 0.84, respectivamente.

Las cantidades de nutrimentos reciclados con la renovación de raíces finas fueron de 20-21 (N), 2 (P), 11-14 (K), 7-9 (Ca) y 3-8 (Mg) kg ha^{-1} a^{-1}, los cuales representaron 5-11 % del aporte total de nutrimentos en residuos vegetales en el sistema cacao/laurel y 3-5 % en el sistema cacao/poró. Las diferencias entre sistemas se debieron al gran aporte de nutrimentos en los residuos de poda del poró.

Las pérdidas de peso, debidas a la descomposición de raíces finas durante 25 semanas de la época húmeda, fueron: poró 85 %; cacao bajo poró 43 %; laurel 43 %; cacao bajo laurel

38 %. En la época seca las pérdidas fueron 10-15 % menores y cacao (los dos sistemas) tuvo pérdidas más bajas.

La liberación de N estuvo altamente correlacionada con la pérdida de peso seco de todas las especies, especialmente en la época húmeda. La liberación de nutrimentos fue: K > Mg > P > N > Ca. En la primera semana de descomposición se liberó entre el 82-92 % del contenido inicial de K de todas las especies en las 2 épocas (seca o húmeda). En contraste, hubo acumulación de Ca durante las primeras 6 semanas de la época húmeda y con excepción de poró, no hubo liberación de Ca durante las 18 semanas de la época seca.

MUÑOZ ARBOLEDA, F. 1993. Fine root dynamics in agroforestry systems of cacao, shaded by poró or laurel, in Turrialba, Costa Rica.

Key words: Agroforestry systems, biomass, Ca, *Cordia alliodora*, decomposition, *Erythrina poeppigiana*, fine root turnover, K, Mg, N, nutrient release, P, *Theobroma cacao*.

SUMMARY

Fine root biomass (BTRF), productivity of fine roots (TPRF), decomposition and nutrient release from fine roots (diameters < 2 mm) were studied in 15 year old experimental plots of cacao (*Theobroma cacao*) shaded by poró (*Erythrina poeppigiana*) or laurel (*Cordia alliodora*).

Fine root biomass was stable except for a significant increase, in the cacao/laurel system, at the begining of the rainy season. Fine root biomass in the cacao/laurel system varied between 1,000 and 1,847 kg ha^{-1} and in the cacao/poró system between 925 and 1,198 kg ha^{-1} (oven-dry weights).

The productivity of fine roots of cacao was low in October (high precipitation), December (following cacao pruning) and in March (dry season) but increased significantly when the rains began (May). The productivity of fine roots of laurel and poró reached a maximum in October (high precipitation) and a minimum in March (Dry season). Laurel had higher fine root production rates than poró in October and December.

Fine root turnover during the four driest months was 0.07 and 0.16 in the cacao/laurel and cacao/poró systems, respectively. During the four months of the rainy season when this study was carried out the rates were 0.46 and 0.34, respectively. Based on these values, annual fine root turnover was estimated to be 0.99 and 0.84, respectively.

Nutrient recycling *via* fine root turnover provided 20-21 (N), 2 (P), 11-14 (K), 7-9 (Ca), 3-8 (Mg) kg ha^{-1} yr^{-1}, which represented 5-11 and 3-5 % of the nutrients recycled in plant residues in the cacao/laurel and cacao/poró systems, respectively. The inter-system differences were due to the large nutrient inputs in poró pruning residues.

Dry weight losses, due to decomposition of fine roots during 25 weeks of the rainy season, were: poró (85 %); cacao under poró (43 %); laurel (43 %); cacao under laurel (38 %). During the drier months, weight losses were 10-15 % lower. Cacao (both systems) had the lowest decomposition rates.

The liberation of N was highly correlated with dry weight losses of all the species, especially during the rainy season. Rates of nutrient liberation from fine roots were: K > Mg > P >

N > Ca. During the first week of decomposition, 82-92 % of the initial K content was released by all species in both seasons (dry and rainy). In contrast, Ca was accumulated during the first six weeks of the rainy season and with the exception of poró, there was no Ca release during 18 weeks of the dry season.

INDICE DE CUADROS

En el texto **Página**

Cuadro 1. Número de muestras para estimar biomasa total y tasas de producción de raíces finas en los sistemas agroforestales de cacao con sombra de laurel o poró. 19

Cuadro 2. Tasas de renovación de raíces finas de los sistemas cacao/laurel y cacao/poró durante 4 meses del período seco en Turrialba, Costa Rica. 33

Cuadro 3. Tasas de renovación de raíces finas de los sistemas cacao/laurel y cacao/poró durante 4 meses del período húmedo en Turrialba, Costa Rica. 34

Cuadro 4. Tasas anuales estimadas de renovación de raíces finas (TRRF) de los sistemas cacao/laurel y cacao/poró. 35

Cuadro 5. Aporte anual (1992-1993) de N, P, K, Ca y Mg (kg ha^{-1} $año^{-1}$) a partir de la biomasa de raíces finas (0-15 cm), hojarasca natural y de podas en los sistemas cacao/laurel y cacao/poró en Turrialba, Costa Rica. 37

Cuadro 6. Número de muestras utilizadas para estimar la descomposición de las raíces de laurel, poró y cacao. 45

Cuadro 7. Correlación entre pérdida de peso seco y liberación de nutrimentos a partir de la descomposición de las raíces finas de laurel, poró y cacao en la época húmeda en Turrialba, Costa Rica 53

Cuadro 8. Correlación entre pérdida de peso seco y liberación de nutrimentos a partir de la descomposición de las raíces finas de laurel, poró y cacao en la época seca en Turrialba, Costa Rica. 54

Cuadro 9. Porcentaje de K remanente por especie en la época húmeda (Valores observados). 62

Cuadro 10. Porcentaje de K remanente por especie en la época seca en (Valores observados). 63

INDICE DE FIGURAS

En el texto | Página

Figura 1. Distribución de los tratamientos estudiados en el Ensayo Central, CATIE, Turrialba, Costa Rica. 13

Figura 2. Ubicación de la parcela útil, área de muestreo y arreglo de las especies. 14

Figura 3. Distribución de muestras para medir biomasa y tasas de producción de raíces finas en los sistemas cacao/poró y cacao/laurel en Turrialba, Costa Rica. 15

Figura 4. Fechas de muestreo de biomasa y tasas de producción de raíces finas de los sistemas cacao/laurel y cacao/poró en Turrialba, Costa Rica. 20

Figura 5. Biomasa de raíces finas en los sistemas cacao/laurel y cacao/poró en Turrialba, Costa Rica. 26

Figura 6. Tasas de producción de raíces finas de laurel, cacao, y poró en Turrialba, Costa Rica 30

Figura 7. Tensión de humedad del suelo en los sistemas cacao/poró y cacao/laurel en el ensayo Central, CATIE, Costa Rica 31

Figura 8. Método de colocación de las bolsas de descomposición de raíces finas en el suelo. 44

Figura 9. Localización de las bolsas de descomposición de raíces finas de cacao con laurel o poró en el Ensayo Central, CATIE, Costa Rica. 46

Figura 10. Distribución temporal de retiro de bolsas de descomposición de raíces finas de cacao, laurel y poró con respecto a precipitación y podas. 47

Figura 11. Tasa de descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época húmeda en Turrialba, Costa Rica. 50

Figura 12. Tasa de descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época seca en Turrialba, Costa Rica. 51

Figura 13. Liberación de N a partir de la descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época húmeda en Turrialba, Costa Rica 56

Figura 14. Liberación de N a partir de la descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época seca en Turrialba, Costa Rica 57

Figura 15. Liberación de P a partir de la descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época húmeda en Turrialba, Costa Rica 59

Figura 16. Liberación de P a partir de la descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época seca en Turrialba, Costa Rica 60

Figura 17. Liberación de Ca a partir de la descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época húmeda en Turrialba, Costa Rica 64

Figura 18. Liberación de Ca a partir de la descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época seca en Turrialba, Costa Rica 65

Figura 19. Liberación de Mg a partir de la descomposición de raíces finas de poró,laurel y cacao durante la época húmeda en Turrialba, Costa Rica 67

Figura 20. Liberación de Mg a partir de la descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época seca en Turrialba, Costa Rica 68

1 INTRODUCCION

La agroforestería es un sistema de uso de la tierra en el que se integran dos o más componentes básicos de producción, tales como ganadería o agricultura, con al menos un componente forestal. En general se considera a los sistemas agroforestales como formas de producción en las cuales la explotación de los recursos es más eficiente y con mayor sostenibilidad a través del tiempo que las de los sistemas de producción basados en cultivos anuales.

Los sistemas en los que se desarrolló el presente estudio, cacao/poró (*Theobroma cacao* L./ *Erythrina poeppigiana*) y cacao/laurel (*T. cacao* L./ *Cordia alliodora* (Ruiz & Pavón) Oken), incluyen como cultivo principal, un perenne, el cacao y un componente forestal que da sombra al cultivo. Las dos especies forestales de sombra involucradas en este estudio son muy diferentes. El laurel es una especie forestal maderable, la cual al final de su ciclo significará un beneficio económico adicional a la producción del cacao. Mientras que el poró es un árbol de servicio, puesto que sus funciones principales son las de proveer sombra cuando lo necesita el cacao, fijar nitrógeno y favorecer la recirculacion de nutrimentos en el sistema. Su posible beneficio económico se expresará con un mayor rendimiento del cacao a corto o largo plazo.

Las raíces finas muertas junto con la deposición de hojarasca son las dos principales fuentes de materia orgánica que intervienen en el ciclo de nutrimentos en sistemas agroforestales (Persson, 1979). En estudios anteriores (años 5º y 10º) de este mismo ensayo, se tomaron muestras de raíces menores de 5 mm de diámetro a profundidades de 0-15, 15-30 y 30-45 cm en los sistemas de producción de cacao bajo sombra de laurel y poró (Alpizar et al, 1986; Beer et al, 1990). En estas ocasiones solo se hizo un inventario de las raíces

existentes en un momento dado y no se pretendió describir su comportamiento dinámico. Por lo tanto al planear este estudio los objetivos fueron: i) Estudiar la dinámica de las raíces finas de los sistemas agroforestales Cacao-Poró, Cacao-Laurel, en el Ensayo Central de La Montaña en Turrialba, Costa Rica. ii) Cuantificar la proporción en que contribuyen las raíces finas en la recirculación de nutrimentos de estos sistemas agroforestales, comparado con la producción de hojarasca (natural y de podas) durante el mismo período de tiempo. La hipótesis de trabajo fue: "*El aporte de nutrimentos a partir de la renovacion de las raíces finas es una ruta importante dentro del ciclo de nutrimentos, en los sistemas de cacao con sombra de poró o laurel*".

2 REVISION DE LITERATURA

2.1 Importancia del estudio de raíces finas

Estudios anteriores han demostrado que una gran proporción de la Producción Primaria Neta (PPN) de la vegetación natural y de los cultivos, ocurre bajo tierra, en el sistema radicular. En ecosistemas de bosque la proporción de la PPN invertida en raíces totales puede ser de 40-73 %; en comunidades de estepa arbustiva y pastizales naturales 65-66 % y 50-85 % respectivamente (Fogel, 1985). Las raíces finas muertas y los exudados de la raíz son un gran aporte de materia orgánica y nutrimentos al sistema del suelo. También se ha reportado que del 5-68 por ciento de la PPN es dedicada a la renovación de raíces finas en árboles, aunque estas, en la mayoría de los casos constituyen menos del 5 por ciento de la biomasa de un árbol (Santantonio, 1990). La proporción varía con el tipo de vegetación, condiciones del suelo, y en agroecosistemas, también con las prácticas culturales. Por lo tanto el momento y sitio de la muerte de raíces son muy importantes (Anderson e Ingram, 1987) para conocer el balance de nutrimentos en un sistema de producción en un momento dado y mejorar su manejo. La mayoría de los estudios de raíces finas existentes hasta el momento, han sido realizados en ecosistemas y cultivos de la zona templada (Dahlman y Kucera, 1965; Moir y Bachelard, 1969; McClaugherty *et al*, 1982; Fogel, 1983, 1985; Persson, 1978, 1979; 1980; 1983; Fabião *et al*, 1985; Steen, 1984, 1985; Hansson y Andrén, 1986; Santantonio y Grace, 1987; Santantonio y Santantonio, 1987; Santantonio, 1990).

2.2 Producción de raíces finas

En café se ha reportado fluctuación de la biomasa de raíces finas relacionada con condiciones estacionales de humedad del suelo (Huxley y Turk,1974). De otro lado, prácticas culturales, como la poda, pueden también causar muerte de raíces finas en los géneros *Leucaena, Erythrina* e

Inga (Dijkman, 1950; Russo,1984; Smyth, 1990). En los pocos trabajos de descripción del ciclo de la materia orgánica en sistemas agroforestales con cultivos perennes, se han hecho estimaciones aproximadas y estáticas de la biomasa de raíces finas (Alpizar *et al*, 1986; Beer *et al*, 1990). En otras ocasiones se ha dado mucho más énfasis al reciclaje de la hojarasca (natural y de podas) (Beer, 1988), o se ha pasado por alto el papel que juegan las raíces finas en el ciclo de los nutrimentos en los sistemas agroforestales con cultivos perennes.

2.3 Descomposición raíces finas

En bosques de coníferas de la zona templada se ha encontrado que las raíces finas y las micorrizas producen la mayor parte de la materia orgánica que entra en descomposición (Fogel, 1983). La tasa de descomposición de raíces finas en las zonas templadas está influenciada por el cambio estacional de la temperatura del suelo, más que por su contenido de humedad (Santantonio y Grace, 1987). Sin embargo, en la zona tropical, donde la temperatura del suelo es relativamente constante, es posible que ocurra lo contrario. Por lo tanto, posiblemente la tasa de descomposición en el trópico será más afectada por las fluctuaciones de humedad que por la temperatura del suelo.

2.4 Trabajos anteriores relacionados con el estudio

2.4.1 Cacao

Inicialmente se estudió el desarrollo del cacao, poniendo mayor énfasis en el crecimiento de la parte aérea y en el efecto de factores ambientales sobre ella. En plantaciones de cacao en Costa de Oro se realizaron estudios del efecto de sombra, humedad del suelo, temperatura del aire y brillo solar, sobre el rebrotamiento de cacao. Se concluyó que hay mayor frecuencia en los "pulsos" de crecimiento aéreo en el cacao cultivado sin sombra, y que ninguno de los factores estudiados, excepto la temperatura, parecían jugar

un papel importante en el crecimiento aéreo del cacao. También se concluyó que hasta un año de edad el ritmo de crecimiento aéreo del cacao era regular y periódico, y partir de esa edad el ritmo de crecimiento se daba por la interacción de factores endógenos y ambientales (Greenwood y Posnette, 1950).

Después, bajo condiciones controladas se estudió el efecto de la temperatura sobre el rebrote de tallos y el desarrollo de las hojas (Sale, 1968) y sobre el desarrollo extensivo del cacao (Sale, 1969). También se estudiaron los efectos de la humedad del suelo y la humedad relativa sobre rebrote, floración y fructificación (Sale, 1970a, 1970b). Se realizaron estudios en los que se controlaron fotoperíodo, humedad relativa, temperatura y fertilidad del suelo (Greathouse et al, 1971; Alvim *et al*, 1974). Después de estos estudios se llegó a la conclusión de que el crecimiento aéreo del cacao bajo condiciones controladas era regular y rítmico y que existían períodos de "dormancia" de la parte aérea entre cada uno de los períodos de crecimiento.

Posteriormente, se realizaron trabajos en invernadero en los que se evaluaron simultáneamente el crecimiento aéreo y radicular, en estos estudios se observó que los períodos de "dormancia" reportados en estudios anteriores, coinciden con períodos de crecimiento activo de raíces finas (Vogel, 1975). El estado hídrico y la disponibilidad de carbohidratos en la planta parecen ser los factores principales que controlan el crecimiento rítmico alterno de la parte aérea y radicular del cacao (Hardwick *et al*, 1982; Taylor y Hadley, 1987).

En una plantación en Brasil, se estudiaron simultáneamente el crecimiento de raíces finas y el crecimiento de rebrotes de la parte aérea. En este estudio se reporta que se observó la ocurrencia de rebrote de la parte aérea cuando el crecimiento de raíces finas estuvo a su más

bajo nivel (Kummerow *et al*, 1982). También se ha relacionado la caída intensiva de hojas del cacao con períodos de crecimiento intensivo de tallo (Alvim *et al*, 1974). Se ha observado que esto ocurre principalmente en los períodos secos mientras que en los períodos húmedos, cuando el suministro de agua y humedad son más constantes, poco o ningún crecimiento de tallo ocurre (Greenwood y Posnette, 1950). Estas observaciones concuerdan con las hechas en el ensayo Central del CATIE, donde se han registrado consecutivamente en los años 1982-85, picos de intensiva deposición de hojarasca del cacao en el mes de marzo (Heuveldop *et al*,1988). En esta época generalmente también se registra el período más seco del año en Turrialba.

2.4.2 Poró y Laurel

Por ser el laurel una especie que produce madera de alto valor comercial, existe mucha literatura disponible sobre estudios de la parte aérea, parámetros de producción, manejo y establecimiento de plantaciones (Greaves and MacCarter, 1990). Existe poca sobre el comportamiento del sistema radicular de esta especie, aunque se han estudiado los efectos de la época de plantación, sitio y métodos de plantación sobre la mortalidad, crecimiento, producción de biomasa aérea, regeneración radicular y arraigamiento (Schlönvoigt, 1993). No se encontró nada sobre el papel que juega la renovación de sus raíces finas en el ciclo de nutrientes de los sistemas agroforestales.

Algunos autores se limitan a hacer observaciones generales sobre el sistema radicular del laurel. En el estado inicial de crecimiento se desarrolla una fuerte raíz pivotante y también se desarrolla un sistema radicular extendido (Marshall, 1930). Las plántulas en el semillero tienen una fuerte raíz (Pérez Figueroa, 1957; Greaves y McCarter, 1990).

Se ha observado que el laurel en la zona de Turrialba, después de tres años de edad alcanza una biomasa de raíces finas muy semejante a la de la vegetación sucesional (Berish y Ewel, 1988). También se han observado poblaciones de laurel en Puerto Rico que parecen no estar sincronizadas fenológicamente con ninguna estación específica; los individuos reportados, rebrotan, florecen y fructifican varias veces durante el año (Johnson y Morales, 1972). Por lo tanto posiblemente presenten un patrón de comportamiento radicular no sincronizado con factores ambientales.

2.4.3 Estudios realizados en el sitio.

Desde la siembra de las parcelas estudiadas (1977), se han realizado varios estudios de la distribución y ciclaje de materia orgánica y nutrimentos en la parte aérea de los sistemas de cacao con sombra de laurel o poró. A la edad de 5 años (1982) se realizó un inventario de materia orgánica y nutrimentos (Alpizar *et al*, 1986). En esa oportunidad además de otras variables se estimó la biomasa de raíces con diámetros entre 20 y 5 mm y menores que 5 mm hasta una profundidad de 45 cm. Se indicó que las raíces con diámetro menor de 5 mm representaban el 63 por ciento de la biomasa de raíces con diámetro menor que 20 mm del sistema cacao/laurel y el 66 por ciento de la del sistema cacao/poró. La biomasa de raíces (<20 mm) estimada en esa oportunidad fue de 4.19 t ha^{-1} en el sistema cacao/laurel y 1.78 t ha^{-1} en el sistema cacao/poró. No se encontraron diferencias notables en la acumulación de N, P, Ca en la biomasa total del cacao de ambos sistemas, aunque K y Mg fueron mayores en el cacao bajo laurel que en el cacao bajo poró. En ambos sistemas los elementos estaban acumulados en el siguiente orden : N > Ca > K > Mg > P .

A la edad de 10 años (1987) se realizó otro inventario de materia orgánica acumulada en los sistemas (Beer *et al*, 1989). Se calcularon índices de productividad, modelos de

material orgánico y sostenibilidad. Se hizo estimación de la biomasa de raíces en los rangos de 20-5 mm y < 5 mm. En esta oportunidad se estimó una biomasa de raíces (< 20 mm)) de 9.8 t ha^{-1} en el sistema cacao/laurel y 5.7 t ha^{-1} en el sistema cacao/poró. Según la comparación hecha con el inventario del quinto año se observó que la biomasa de raíces (< 20 mm) en el décimo año se incrementó 233 % en el sistema cacao/laurel y 320 % en el sistema cacao/laurel. La producción agrícola y la producción primaria neta se incrementaron entre el quinto y décimo años. La deposición de materia orgánica y por lo tanto el ciclaje de nutrimentos fue mayor bajo poró.

En otro estudio, (Heuveldop *et al*, 1988) se evaluó la producción de cacao y madera y la producción y descomposición de residuos (hojarasca). Se reportó que el cacao produjo gran cantidad de hojarasca durante el mes de marzo y que la descomposición de hojas de cacao fue más lenta que la de las hojas de los árboles de sombra. También se reportó reabsorción de nutrimentos antes de la caída de las hojas. Tomando información de los trabajos e información anterior se construyó un modelo con el cual se describen los ciclos de materia orgánica y nutrientes (N P K Ca Mg) de los dos sistemas (Fassbender *et al*, 1988). Se concluyó a partir de los resultados de producción y descomposición de residuos, que el sistema cacao/poró presenta tasas de reciclaje de materia orgánica más rápidas que las del sistema cacao/laurel.

Se calculó el balance hídrico y entrada y lixiviación de nutrimentos en los dos sistemas (Imbach *et al*, 1989). La capa de suelo entre 0-15 cm se mantuvo saturada durante gran parte del año. Se encontró gran similaridad entre las tasas de evapotranspiración de los dos sistemas. Los valores de percolación fueron también similares para los dos sistemas. Las pérdidas de N, P, y K por lixiviación fueron

relativamente pequeñas para ambos sistemas, 5.0, 0.5, y 1.3 kg ha^{-1} a^{-1} respectivamente. Las pérdidas de Ca y Mg fueron mayores, 27 y 20 kg ha^{-1} a^{-1} respectivamente en el sistema cacao/poró *vs* 6 kg ha^{-1} a^{-1} de cada uno en cacao/laurel. Comparando las entradas de nutrientes en la precipitación con las pérdidas por lixiviación se observó que N, P, y K podrían estarse acumulando, mientras que las reservas de Ca y Mg podrían estar decreciendo.

En los anteriores trabajos no se ha realizado ningún estudio que describa la dinámica de las raíces finas de los sistemas cacao/laurel y cacao/poró, lo que hace del estudio a realizar un complemento a los trabajos anteriores.

2.5 Métodos para el estudio de raíces

Existen diversos métodos para el estudio del sistema radicular de las plantas (Böhm, 1979). Debe tenerse en cuenta que todos los métodos tienen problemas. La elección del método a utilizar depende del tipo de estudio que se pretenda hacer y de los objetivos de la investigación.

Para estimar la tasa de producción de raíces finas (<2 mm) se usó el método de bolsas de crecimiento interno ("in-growth bag") (Anderson e Ingram, 1987, Vogt y Bloomfield, 1991). Este método es el más adecuado para estudios dinámicos, dado que la disturbación causada al sistema radicular es mínima. El método de "in-growth bag" consiste en abrir un agujero en el suelo con un barreno y colocar una bolsa de malla (nylon) que cubrirá las paredes del agujero. Posteriormente se rellena el agujero con suelo sin raíces del mismo lugar (Steen, 1984; Fabião *et al*, 1985; Hannson y Andren, 1986). Durante el proceso de rellenado del hueco, se debe tener el cuidado de que el suelo con que se está rellenando quede con densidad aparente similar a la del suelo circundante. Esto se logra compactando el suelo a medida que se va agregando (Noordwijk, 1987). También se ha utilizado

arena para rellenar las bolsas (Persson, 1979). Esta técnica se ha utilizado también para estudiar el efecto de herbicidas (Steen, 1984) y fertilizantes (Steen, 1985) sobre el crecimiento radicular.

Con el método de barreno (Böhm,1979) se puede estudiar la distribución y cantidad de biomasa de raíces en un momento dado. Este método ha sido ampliamente utilizado para estudiar raíces, aunque la mayoría de los trabajos realizados han sido hechos en ecosistemas de la zona templada (Moir y Bachelard, 1969; Roberts, 1976; Ford y Deans, 1977; Persson, 1978, 1979, 1980; Steen,1985; Hansson y Andren, 1986; Santantonio y Santantonio, 1987). Este método puede funcionar bien en cualquier lugar, excepto en lugares con suelo rocoso o alto contenido de arenas. Además se debe tener en cuenta que el lavado y separación de las raíces del suelo puede ser muy dificil, sobre todo en suelos con alto contenido de arcilla. El sorteo de raíces en vivas o muertas; o por especies es extremadamente difícil e impreciso. Tampoco funciona bien con raíces gruesas. En el trópico se han realizado pocos trabajos utilizando la metodología de barreno para estudiar raíces (Berish, 1982; Berish y Ewel, 1988; Cavelier, 1989).

En los estudios del Tropical Soil Biology and Fertility Programme aceptan como satisfactorio el rango de 5-8 cm de diámetro para barrenos de muestreo (TSBF, 1987). Se han comparado muestras tomadas con barrenos de 19 mm, 50 mm y en un agujero de 0.01 m^2. Las estimaciones de biomasa obtenidas con las muestras tomadas de las tres formas fueron similares pero las del barreno de 19 mm fueron procesadas más rápido (MacClaugherty *et al* ,1982). Se debe tener en cuenta que el tamizado en húmedo produce incrementos de 30-40 por ciento en la estimación de la biomasa de raíces menores de 2 mm, al compararse con otros métodos de separación (Fogel,1983).

La tasa de descomposición de raíces muertas de gramíneas perennes, ha sido estudiada usando bolsas de descomposición (Steen, 1985). Existen algunas variantes del método (Noordwijk, 1987; Steen, 1985). Generalmente se han usado bolsas y recipientes cerámicos, estos últimos tienen el inconveniente dejar pasar solo la humedad. En general estos métodos tienen las limitantes de no lograr un contacto natural entre suelo y raíces. Si el tamaño de malla de las bolsas es pequeño puede haber exclusión de la macrofauna y si es demasiado grande puede haber pérdida del material. En estudios anteriores, el tamaño de 5 mm para la malla de las bolsas mostró ser adecuado porque permitió la acción de insectos (MacClaugherty *et al*, 1982). No se conoce ningún estudio en el que se haya estimado la tasa de descomposición de raíces finas de sistemas agroforestales con cacao.

3 MATERIALES Y METODOS

3.1 Localización y características ambientales del sitio

La estación de investigación del CATIE se encuentra localizada a 9° 53´ N, 83° 34´ W y a una altitud de 602 m.s.n.m. (Haggar, 1990). Políticamente el sitio se encuentra en el cantón de Turrialba, Provincia de Cartago, República de Costa Rica. La precipitación anual promedio es de 2648 mm, la humedad relativa promedio es de 87.6%, y el número promedio de días lluviosos es de 246/año (promedios calculados sobre 38 años). La temperatura anual promedio es de 22.3°C (17.7°C Mínima, 27.0°C Máxima), calculados sobre 23 años (Alpizar *et al*, 1986). El suelo del sitio ha sido clasificado como Typic Humitropept, fino, halloysitic, isohyperthermic (Kass, 1989) y sus características edafológicas ya han sido descritas detalladamente (Imbach, 1989).

3.2 Diseño experimental

El Ensayo Central de La Montaña fue establecido en 1977, para estudiar el efecto de diferentes agroecosistemas sobre el suelo. Inicialmente tenía 18 tratamientos, de los cuales solo cuatro se mantienen. Los sistemas a estudiar (cacao-laurel y cacao-poró) forman parte de un diseño de bloques completos al azar en un arreglo de parcelas divididas con dos repeticiones, del cual hacen parte también los sistemas café-laurel y café-poró (Fig. 1).

3.3 Manejo agronómico de las parcelas

Se hacen dos podas anuales tanto del poró como del laurel, generalmente en los meses de diciembre y junio. El poró es sometido a una poda fuerte, para dar luz al cacao y el cacao a una poda de mantenimiento, para eliminar el exceso de ramas y las mal formadas. El material de las podas se distribuye en las parcelas en forma de "mulch" después de registrar su peso. Se hacen dos aplicaciones de fertilizante dirigidas al cacao, una en enero y otra en junio. Desde 1977

se aplica alrededor de cada árbol de cacao 0.6 kg árbol^{-1} año^{-1} de 18-10-6-5 , lo cual sería equivalente a 120 N, 29 P, 33 K y 10 B kg ha^{-1} año^{-1} (Beer, comunicación personal). El cacao de la parcela útil es el cruce interclonal "Catongo x Pound 12" y el de los bordes "EET400 x SCA-12" o "UF-29 x IMC-67". Todo el cacao se encuentra sembrado a 3 m en cuadro, para una densidad resultante de 1,111 árboles ha^{-1}.

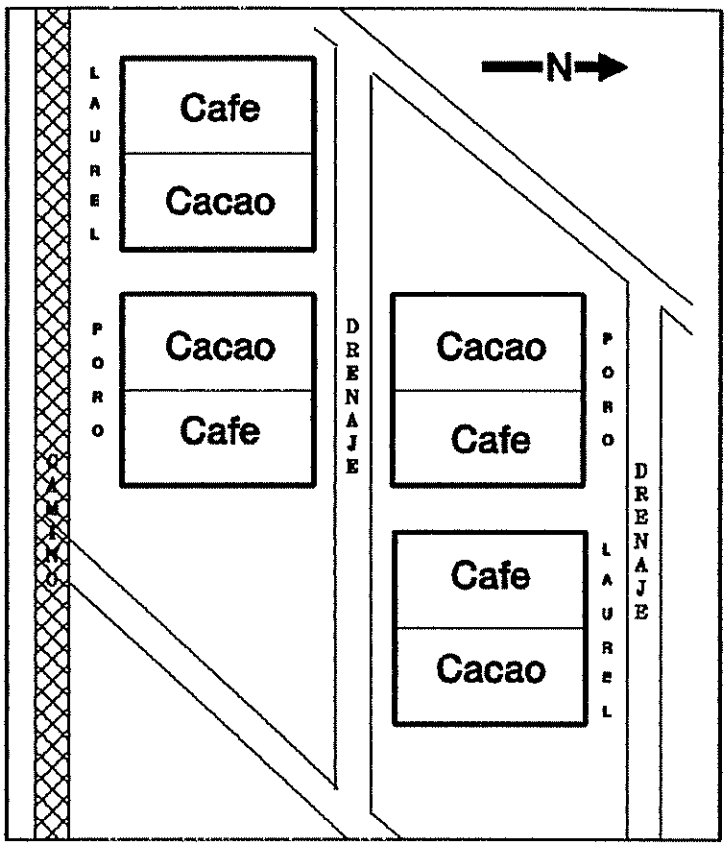


Figura 1. Distribución de los tratamientos estudiados en el ensayo Central, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Los árboles de sombra (Poró y Laurel) están sembrados a 6 m en cuadro y su densidad es de 277 árboles ha^{-1} (Fig. 2).

3.4 Muestreo

Cada parcela tiene un largo de 36 m y un ancho de 18 m (Fig. 2). La parcela útil está compuesta por dos áreas de 144 m^2 o sea que la parcela útil tiene 288 m^2 (144 m^2 x 2 áreas). Dentro de cada área de 144 m^2 se demarcó un area de muestreo de 36 m^2 (Fig 2).

Cada una de las áreas de de muestreo dentro de la parcela útil se dividió en 36 cuadrículas de 1 m^2 y se realizó una estratificación de ambientes con respecto a la posición de los árboles de sombra (Fig. 3). Se hizo esto para asegurar que se muestrearía el área total proporcionalmente con base en la distancia de los árboles de sombra. No hubo

intención de estudiar la variabilidad de las raíces finas con respecto a la distancia de los árboles. La muestra mínima total representativa de los ambientes fue de nueve cuadrículas (Fig. 3) las cuales fueron elegidas al azar.

3.5 Variables estudiadas y métodos usados[1]

Se estimaron: biomasa total, tasas de producción, tasas de descomposición de raíces finas (diámetro <2 mm) y liberación de nutrimentos (N, P, K, Ca, y Mg). A partir de las dos primeras variables se calculó la tasa de renovación de raíces finas ("fine root turnover"). La selección de las fechas de muestreo, se hizo teniendo en cuenta la distribución de las lluvias y el momento de la poda, ya que posiblemente esta práctica cultural y la humedad del suelo son los factores que más afectan el comportamiento de las raíces finas a través del tiempo.

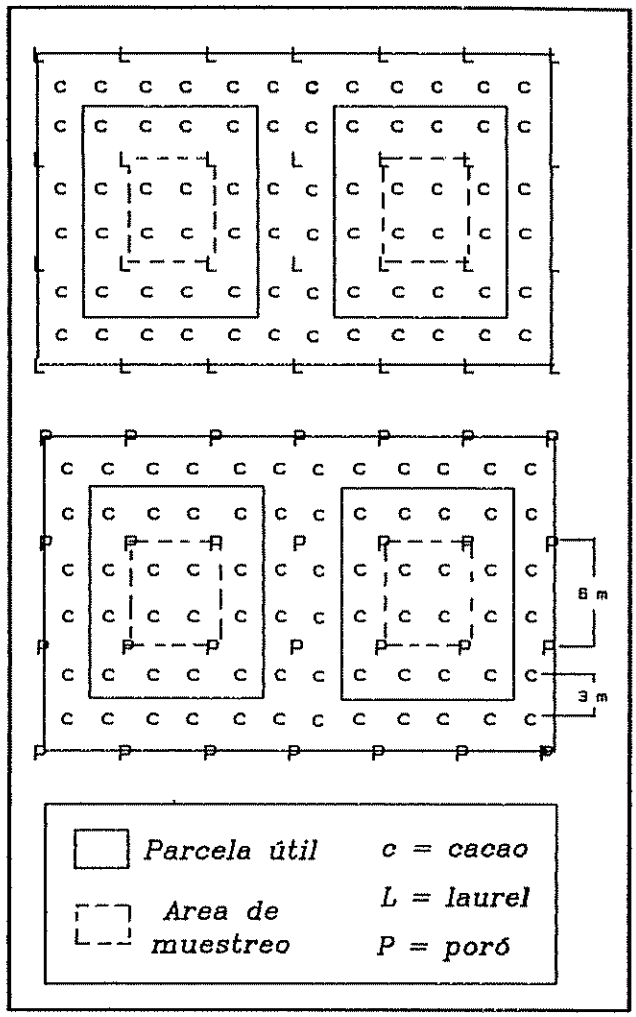
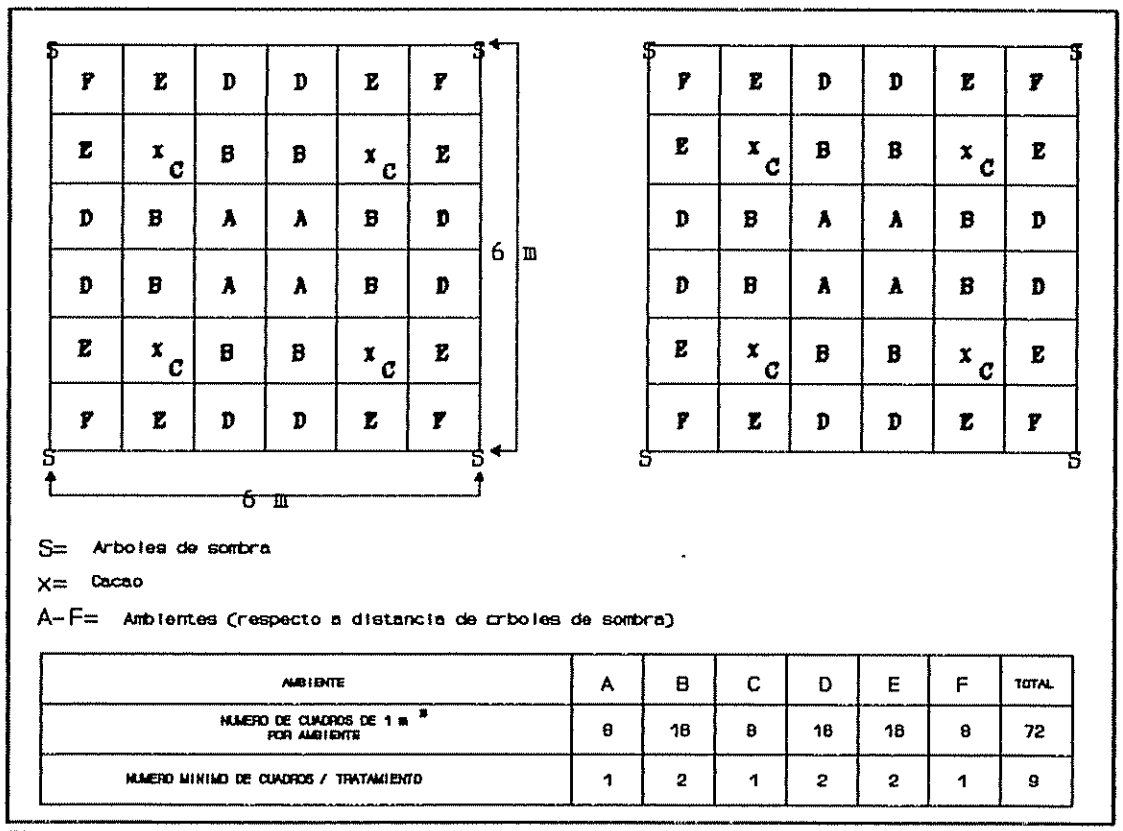


Figura 2. Ubicación de la parcela útil, área de muestreo y arreglo de las especies.

Todas las variables se observaron en los primeros 15 cm de profundidad del suelo, puesto que, en un estudio preliminar realizado hasta una profundidad de 60 cm con observaciones cada 15 cm, se observó que la mayor parte (50-

[1] Vease capítulos 4 y 5 para detalles.

60%) de las raíces finas (< 2 mm) se encontraban en esta parte del perfil del suelo (Muñoz, datos no publicados). Se usaron datos meteorológicos de la estación de La Montaña y se utilizaron cuatro tensiómetros de copa cerámica por parcela para registrar semanalmente la tensión de humedad en los primeros 15 cm del suelo durante el período de estudio. Estos tensiómetros son muy confiables en el rango de 0-80 cbares (Brady, 1974). Por lo tanto reflejaron muy bien las condiciones de humedad del suelo del sitio experimental.



AMBIENTE	A	B	C	D	E	F	TOTAL
NUMERO DE CUADROS DE 1 m² POR AMBIENTE	8	16	8	16	16	8	72
NUMERO MINIMO DE CUADROS / TRATAMIENTO	1	2	1	2	2	1	9

Figura. 3 Distribución de muestras para medir biomasa y tasas de producción de raíces finas en los sistemas cacao/poró y cacao/laurel en Turrialba, Costa Rica.

4 BIOMASA, PRODUCCION Y TASAS DE RENOVACION DE RAICES FINAS

4.1 INTRODUCCION

El conocimiento del comportamiento dinámico del sistema radicular fino de las especies de un sistema agroforestal es de vital importancia, ya que de este depende directamente la capacidad de absorción de agua y nutrimentos de una especie en un momento dado. Tal conocimiento puede ayudar a mejorar prácticas culturales tales como la fertilización, asegurando que se hace en el momento de máxima absorción radicular de una especie y así lograr la sostenibilidad con el uso mínimo de subsidios energéticos. También esta información puede permitir el cálculo de la producción primaria neta de un sistema y el de las contribuciones porcentuales de la hojarasca y renovación de raíces finas al ciclaje de nutrimentos.

Hay pocos estudios sobre la dinámica de raíces finas en agroecosistemas tropicales. Se ha demostrado en estudios de invernadero que el cacao, como muchos árboles tropicales, presenta fases alternas de crecimiento de la raíz y los brotes (Hardwick *et al*, 1982; Sleigh *et al*, 1981; Taylor y Hadley,1987). El crecimiento alterno puede darse como resultado de las oscilaciones de retroalimentación que reflejan los esfuerzos de los árboles para alcanzar un balance funcional entre los sistemas radicular y aéreo ante los estímulos ambientales (Borchert, 1973). En sistemas agroforestales tropicales con cultivos perennes, se han realizado pocos trabajos en raíces finas a nivel de campo. En sistemas agroforestales con cacao se han hecho estudios estáticos (Alpizar *et al*, 1986; Beer *et al*, 1990) y dinámicos (Kummerow et al, 1982) de raíces finas, aunque este último se realizó utilizando solamente datos obtenidos por el método de barrenamiento secuencial.

El objetivo de este estudio fue aportar conocimientos acerca del comportamiento dinámico de la biomasa y las tasas de producción de las raíces finas de absorción (< 2 mm) de los sistemas agroforestales de cacao con sombra de poró o laurel y contrastarlo con el aporte de nutrimentos a partir de la deposición de hojarasca (natural y residuos de podas).

4.2 MATERIALES Y METODOS

Este estudio fue realizado en el período comprendido entre el 9 de octubre de 1992 y el 7 de junio de 1993 en el Ensayo Central de Cultivos Perennes de CATIE (Véase capítulo 3).

4.2.1 Tipo y número de muestras

Para estimar biomasa total de raíces finas (BTRF) se tomaron muestras con barreno (Böhm, 1979). Se estimaron las tasas de producción de raíces finas (TPRF) con bolsas de crecimiento interno ("in-growth bag") (Anderson e Ingram, 1987; Vogt y Bloomfield, 1991). Las muestras se tomaron en cada fecha y época de muestreo, dentro de cada cuadrícula seleccionada (Fig 3). Se tomaron 144 muestras por método (Cuadro 1).

La selección de las fechas de muestreo (Fig. 4) se hizo teniendo en cuenta la distribución de las lluvias, ya que posiblemente la humedad del suelo sea el factor ambiental que más afecta el comportamiento de las raíces finas. La primera fecha (octubre) fue considerada como de alta humedad en el suelo, lo que posiblemente haría de esta fecha la de máxima producción de raíces. El promedio de precipitación en este mes ha sido uno de los más altos durante el año. La segunda fecha de muestreo (diciembre), se planeó esperando observar el efecto de la poda sobre la biomasa total de raíces finas y tasas de producción de las especies que componen los dos sistemas de producción. Además es el período de transición hacia el período seco. La tercera fecha (marzo) fue considerada como de baja humedad en el suelo. Por lo tanto se esperó encontrar en ella las más bajas tasas de producción de raíces finas y biomasa. En la cuarta fecha (mayo) se planeó para observar el comportamiento de las raíces finas de los dos sistemas al reinicio de las lluvias.

El muestreo de biomasa (barrenamientos) solo fue hecho 4 veces dado que el objetivo no fue estimar la tasa de producción de raíces con base en estos valores (Cuadro 1).

Cuadro 1. Número de muestras para estimar biomasa total y tasas de producción de raíces finas en los sistemas agroforestales de cacao con sombra de laurel o poró en Turrialba, Costa Rica

Método muestreo.	Variable estimada	Bloques	Tratam.	Nº de Muestras x parcela	Nº de Fechas	Total
Barrenamiento	Biomasa total	2	2	9	4	144
Bolsas de crecimiento	Tasa de producción	2	2	9	4	144

4.2.2 Biomasa total de raíces finas

La biomasa total de raíces finas (BTRF) se estimó utilizando un barreno con diámetro interno de 4.8 cm (volúmen por muestra = 271 cm^3) que se introdujo hasta una profundidad de 15 cm con la ayuda de un mazo de madera. Se muestreó en cuatro fechas, en cada una de las nueve cuadrículas seleccionadas de cada sistema (Fig. 3). Las raíces presentes en las muestras se separaron del suelo por el método de tamizado en húmedo (tamiz 0.5 mm)(Bohm, 1979; Fogel, 1983) dentro de 48 horas después de tomar las muestras en el campo. Cuando no se procesaron en el mismo día, las muestras se mantuvieron refrigeradas.

Las raíces de las muestras solamente se limpiaron de material extraño que incluyó nódulos de poró. La separación de las raíces del material extraño se hizo con la muestra dispersa en un recipiente con agua y utilizando pinzas de punta fina. El proceso de limpieza consumió gran cantidad de tiempo y tuvo un alto costo. No se realizó separación en raíces muertas y vivas por no conocerse un método confiable y aplicable a esta situación. Tampoco se hizo separación por especie, debido a la fragmentación de raíces que se presentó al procesar las muestras. Después de tener las raíces "libres" de material extraño, se las colocaron al horno a

65°C hasta que llegaron a peso constante (± 0.001 g) y se pesaron.

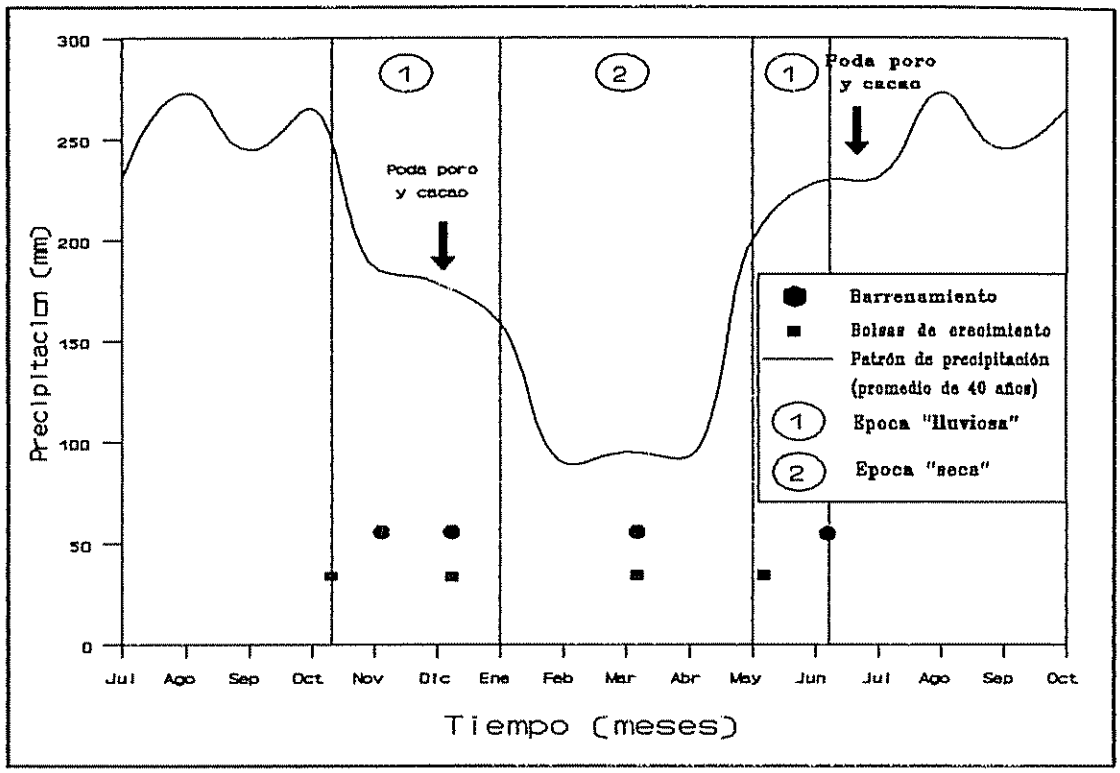


Fig. 4 Fechas de muestreo de biomasa y tasas de produción de raices finas de los sistemas cacao/laurel y cacao/poró en Turrialba, Costa Rica (1992-1993)

Se debe tomar en cuenta que hay posibilidad de sub-estimar la BTRF debido a la gran fragmentación de las raíces y a la no recuperación de raíces muy finas (pelos absorventes). De otro lado, también hubo posibilidad de sobre-estimación por contaminación por materia orgánica diferente de raíces (fragmentos muy pequeños de hojas, corteza, flores y semillas).

Se calculó un factor de corrección para estimar el peso promedio de partículas de suelo adheridas a las raíces. Se hizo un "pool" de todas las muestras de cada sistema en cada fecha y de este se sacaron tres submuestras que se colocaron a calcinar en una mufla a 650 °C durante 8 horas. Al cabo de la calcinación se tomó el peso de partículas de suelo que

contaminaban las raíces. Este peso se consideró como libre de cenizas debido a que en la pequeña muestra calcinada (aproximadamente 0.3 g), el peso de las cenizas fue insignificante.

4.2.3 Tasas de producción de raíces finas

Para estimar la tasa de producción de raíces finas (TPRF) se usó el método de bolsas de crecimiento interno "in-growth bag" (Anderson e Ingram, 1987; Vogt y Bloomfield, 1991). Este método consiste en medir el crecimiento de raíces nuevas dentro de un volumen conocido de suelo libre de raíces y contenido en una bolsa de malla. Las bolsas (tamaño de abertura de la malla 5 mm) se colocaron en las nueve cuadrículas seleccionadas en cada parcela. Los huecos hechos al tomar la muestra de biomasa total fueron aprovechados para colocar las bolsas, excepto en la primera y última fecha donde las muestras fueron tomadas en fechas diferentes (Fig. 4). Se utilizó un tubo plástico de diámetro un poco menor que el del barreno para colocar la bolsa de malla de nylon que cubrió las paredes del hueco y a través del mismo tubo se agregó el suelo "limpio" de la parcela correspondiente.

Los huecos donde se colocaron las bolsas se hicieron con el mismo barreno utilizado para tomar las muestras de biomasa de raíces finas. El diámetro externo de este fue de 5.13 cm y por lo tanto el volumen por muestra fue de 310.03 cm^3. Para rellenar los huecos se utilizó suelo recolectado del área de borde de cada parcela. Para limpiar este suelo se lo pasó por un tamiz de 1 cm y se secó al sol. Posteriormente, se pasó por un tamiz de 2 mm y se extendió en una capa muy delgada sobre una mesa. Se limpió de materia orgánica fina con una hoja de polietileno la cual se cargó con energía estática generada por rozamiento. De esta manera las partículas pequeñas de materia orgánica quedaron adheridas a la lámina.

Antes de iniciar el trabajo se hizo un estudio de la densidad aparente del sitio por el método volumétrico, tomando seis muestras por parcela. Con este dato y el volumen del hueco hecho por el barreno, se calculó el peso del suelo que debería utilizarse para rellenar los huecos (D.aparente = Peso * Vol^{-1}). Para lograr densidad aparente similar a la del suelo circundante, el suelo fue compactado con un bastón de madera a medida que se colocó en el hueco a través del tubo plástico. Al terminar de rellenar los agujeros se les aplicó agua para homogenizar su humedad con la del suelo circundante y posteriormente se les cubrió con hojarasca. Las bolsas se dejaron en el campo por un período de 4 semanas.

Al momento de retirar las bolsas del suelo se hizo un corte en el suelo y alrededor de las bolsas con una navaja, para asegurarse de que al extraerlas no se perderían raíces. Después de retirar las bolsas del suelo, se separaron el suelo y las raíces que crecieron dentro de la bolsa con un lavado con agua corriente sobre un tamiz de 0.5 mm. Las raíces recuperadas se separaron por especie teniendo en cuenta criterios como coloración y forma, los cuales son muy confiables en raíces vivas de las especies estudiadas. Las muestras se procesaron el mismo día de recuperadas. Se secaron al horno a 65°C hasta peso constante (± 0.001) y se pesaron.

Se calculó un factor de corrección para estimar el peso promedio de las partículas de suelo adheridas a las raíces vivas de cada especie. Para cada especie se hizo un pool de las raíces que crecieron dentro de las bolsas en los cuatro períodos de muestreo. Luego se sacaron tres submuestras por especie que se colocaron a calcinar en una mufla, siguiendo el procedimiento descrito anteriormente.

4.2.4 Tasas de renovación de raíces finas

La tasa de renovación de raíces finas (TRRF) se calculó utilizando los datos de BTRF y PRF, en la siguiente ecuación:

TRRF = PRF / BTRF (Dahlman y Kucera, 1965; Cavelier, 1989)

Donde:

PRF es la producción promedio de raíces finas en cada período

BTRF es la biomasa total promedio en cada período (vivo más muerto)

Se calculó la tasa de renovación de raíces finas (TRRF) para cada sistema en cada período estudiado (seco y húmedo) y además se realizó una extrapolación para calcular la tasa anual de renovación de raíces finas. Se utilizó la información de la tensión de humedad en el suelo para separar el período de estudio en "seco" y "húmedo" (Fig. 4). El período "seco" comprendió los meses de enero a abril y el "húmedo" los meses de octubre-diciembre y mayo-septiembre. Para extrapolar se asumió que las tres estimaciones de BTRF y PRF realizadas en el período "húmedo", fueron representativas de los ocho meses de la época lluviosa que se presenta en la zona.

4.3 ANALISIS ESTADISTICO

4.3.1 Biomasa total de raíces finas

Esta variable fue analizada bajo un modelo de parcelas sub-divididas en el cual la parcela principal fue el sistema (Cacao-poró; Cacao-laurel), la sub-parcela el ambiente (Fig. 3) y la sub-sub parcela la fecha de muestreo (Gómez y Gómez, 1984). Se utilizó el procedimiento GLM de SAS. El modelo estadístico fué el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + \beta_i + S_j + \epsilon_{ij} + A_k + SA_{jk} + \epsilon_{ijk} + T_l + ST_{jl} + AT_{kl} + SAT_{jkl} + \epsilon_{ijkl}$$

donde:

μ	Es la media general
β_i	Es el efecto fijo del bloque i
S_j	Es el efecto fijo del factor de la parcela principal (Sistema)
ϵ_{ij}	Es el error aleatorio experimental asociado a la parcela principal (Sistema)
A_k	Es el efecto fijo del factor de la sub-parcela (Ambiente)
SA_{jk}	Es la interacción entre los factores Sistema j y Ambiente k
ϵ_{ijk}	Es el error aleatorio experimental asociado a la sub-parcela
T_l	Es el efecto fijo del factor de la sub-sub-parcela (Tiempo)
ST_{jl}	Es la interacción entre los factores Sistema j y Tiempo l
AT_{kl}	Es la interacción entre los factores Ambiente k y Tiempo l
SAT_{jkl}	Es la interacción entre los factores Sistema j Ambiente K y Tiempo l
ϵ_{ijkl}	Es el error aleatorio experimental asociado a las subparcelas

Se utilizó la prueba de Duncan para hacer la comparación de las medias de los efectos fijos que presentaron diferencias significativas.

4.3.2 Tasa de producción de raíces finas

Esta variable se analizó bajo el mismo modelo y con el mismo procedimiento GLM de SAS que fueron utilizados para analizar biomasa total de raíces finas. Se hicieron análisis separados para el cacao y los árboles de sombra.

4.4 RESULTADOS Y DISCUSION

4.4.1 Biomasa total de raíces finas

No hubo diferencias significativas entre ambientes de muestreo (Fig. 3) para ninguno de los sistemas durante el período de estudio. Por lo tanto en trabajos posteriores se podría hacer muestreo al azar. El suelo adherido a las raíces muestreadas con barreno representó 13-20 % del peso seco de las raíces finas.

Una de las hipótesis iniciales fue que la biomasa de raíces (muertas y vivas) sería menor en el período más seco i.e, febrero-abril. Sin embargo, la biomasa fue estable en las primeras tres fechas de muestreo en los dos sistemas y mostró aumento significativo solamente en la última fecha (junio) en el sistema cacao/laurel (Fig. 5). Desafortunadamente no fue posible medir las proporciones de raíces muertas y vivas por lo que es posible que a pesar de que la BTRF no cambió las proporciones si.

Para explicar el aumento de biomasa en junio en el sistema cacao/laurel debe tomarse en cuenta que los árboles mantienen el equilibrio entre las partes radicular y aérea ante los estímulos ambientales (Borchert, 1973). La caida de las hojas de laurel entre marzo-junio (Beer *et al,* 1993) podría ser debida a una disminución del área de absorción debida a mortalidad de raíces en los meses más secos. Cuando se reiniciaron las lluvias en el mes de mayo, hubo incremento significativo de la TPRF del cacao (Fig. 6). El aumento correspondiente a laurel y poró no fue significativo pero es razonable suponer que sea real (Fig. 6). Por lo tanto el incremento de la BTRF del sistema cacao/laurel en el mes de junio pudo ser ocasionado por la acumulación de las raíces muertas en la época seca más el aumento de las TPRF debido al incremento en la humedad del suelo al reiniciarse las lluvias (Fig.7). Dado que hubo menor variación en la humedad del suelo bajo cacao/poró pudo haber menor mortalidad de

raíces en este sistema durante el período seco. Además la descomposición de las raíces del poró es mucho más rápida comparada con la del laurel (Vease capítulo 5).

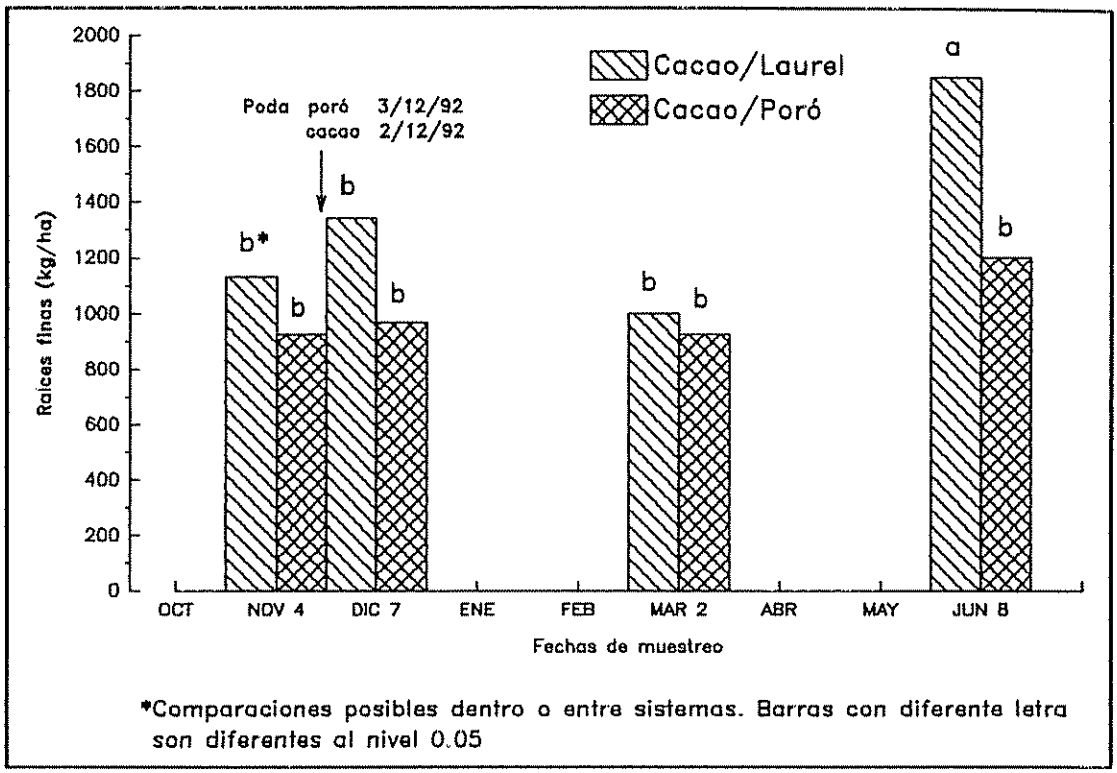


Figura 5 Biomasa de raíces finas en los sistemas cacao/laurel y cacao/poró en Turrialba, Costa Rica.

La diferencia de biomasa de raíces en el sistema cacao/laurel entre marzo y junio fue de 847 $kg.ha^{-1}$ (Fig. 5). Este aumento no puede ser explicado por las tasas de producción de raíces de cacao y laurel observadas en marzo y mayo. Parte de la explicación para tal inconsistencia sería una sobreestimación de la BTRF del sistema cacao/laurel y/o una subestimación de las tasas de producción que pudo ser causada por mortalidad de raíces y rápida descomposición dentro de la bolsa o poco crecimiento de raíces dentro de la bolsa. Además se debe tener en cuenta que el crecimiento anormal de raíces que han sido cortadas con el barreno, la falta de competencia de otras raíces en el suelo "limpio" (Hansson y Andrén, 1986) y la diferente estructura del suelo dentro de la bolsa de crecimiento interno, son algunas de las

limitaciones que deben tomarse en cuenta al utilizar este método. Aunque es uno de los métodos más aconsejables y exactos (Steen, 1984) si se compara con las grandes limitaciones de las ventanas de observación y los rhizotrones (Vogt and Bloomfield, 1991) y el intensivo trabajo de los barrenamientos secuenciales (Steen,1984).

El inventario que se realizó a los cinco años de sembrado el ensayo se reportó BTRF (diámetro < 5 mm) de 2.6 t ha^{-1} para el sistema cacao/laurel y 1.2 t ha^{-1} para el sistema cacao/poró (Alpizar, 1986). A los diez años (Beer *et al*, 1990) se reportó BTRF (diámetro < 5 mm) de 6.1 y 2.5 t ha^{-1} para los sistemas cacao/laurel y cacao/poró respectivamente. Para comparar los valores a los 5 y 10 años con los valores máximos estimados en este estudio (16 años; 1.8 t ha^{-1} para el sistema cacao /laurel y 1.2 t ha^{-1} para el sistema cacao/poró), se deben tener en cuenta los siguientes aspectos para los inventarios anteriores: i) se muestreó hasta una profundidad de 45 cm y no hasta 15 cm; ii) no se estimó el peso de las partículas adheridas a las raíces; y iii) el límite de clase en los inventarios anteriores fue de 5 mm de diámetro y en este estudio fue de 2 mm . De otro lado, en los estudios anteriores pudo haber una subestimación de la biomasa de raíces ya que se usaron tamices de malla muy grande (5 mm) para la separación de las raíces del suelo, lo que probablemente resultó en la pérdida de raíces durante la separación. A pesar de las dificultades de tales comparaciónes siempre hay concordancia en que la BTRF del sistema con laurel es mayor que la del sistema con poró.

En un cacaotal de 11 años sombreado por *Erythrina glauca* en Brasil (Kummerow *et al*, 1981), se realizó un inventario de raíces de cacao hasta 10 cm de profundidad. Se estimó una biomasa de raíces finas (<2 mm) de 0.91 t ha^{-1}. No se reportan datos de biomasa de raíces de *Erythrina glauca* ni cuales criterios se usaron para el sorteo por especie. En el

mismo sitio en Brasil (Kummerow y Souza, 1982), se realizó un estudio que incluyó estimación de la biomasa de las raíces finas de cacao (1-2 mm de diámetro) durante 6 meses. Se utilizó el método de barreno hasta una profundidad de 10 cm dando un valor promedio de 0.5 t ha^{-1} de raíces finas en un momento dado (vivas + muertas) .

Las estimaciones realizadas en los estudios hechos en Brasil son comparables con la BTRF (< 2 mm) de los dos sistemas en el presente estudio (Fig. 5). Sin embargo se debe tener en cuenta que los inventarios de raíces finas en Brasil, se realizaron 11 años después de sembrado el cacao y la biomasa reportada corresponde solo al cacao, mientras que el presente estudio se realizó a los 15 a 16 años de sembrado el cacao y la BTRF corresponde a la biomasa de las dos especies en cada sistema. Además se deben tener en cuenta las diferentes condiciones climáticas y ambientales.

En un estudio realizado en Panamá (Cavelier, 1989) en dos bosques tropicales, uno semideciduo bajo (60 msnm) y otro montano lluvioso (1200 msnm) se estimó una biomasa de raíces finas (diámetro < 2 mm) de 2.4 t ha^{-1} y 3.8 t ha^{-1} respectivamente. En el bosque bajo (precipitación 2567 mm) se presenta un período seco en enero-abril con pico de deposición de hojarasca en marzo; lo mismo que pasa en Turrialba (Vease capítulo 3; Fig. 4; Heuveldop *et al*, 1988; Beer *et al*, 1993). Por lo tanto, los valores estimados de los inventarios de raíces finas en el presente estudio (0.9-1.8 t ha^{-1}) son comparables al del bosque bajo estudiado en Panamá (Cavelier, 1989) pero se debe tomar en cuenta que en el estudio de Panamá no se hizo corrección por suelo adherido a las raíces.

4.4.2 Tasas de producción de raíces finas

En cuanto a las tasas de producción de raíces finas (TPRF) de cacao no hubo diferencias significativas entre

ambientes de muestreo (Fig. 3) para un sistema, ni entre los valores para cacao bajo los dos tipos de sombra para una fecha dada. La única diferencia observada fue que la TPRF de cacao en el cuarto período (reinicio de lluvias) fue mayor que la de los otros períodos (Fig. 6). Con excepción del último muestreo (mayo-junio), las TPRF de cacao fueron menores que las de poró y laurel. Las bajas TPRF del cacao en los meses de octubre a enero (Fig. 6), pueden ser el reflejo de una mayor asignación de recursos hacia la formación de frutos de junio a noviembre. El pico máximo de cosecha de cacao en este ensayo se presenta de octubre a noviembre (Mora *et al*, 1993). Ademas puede haber un posible efecto de la poda de cacao en diciembre sobre la producción de raíces finas. El posible agotamiento de cacao debido a su productividad fue demostrado en estudios en Brasil (Alvim *et al*, 1974), donde se observó disminución del rebrote de ramas en plantas de cacao del cultivar Catongo que fueron polinizadas manualmente en forma intensiva. Las plantas con gran número de frutos mostraron síntomas de muerte descendente los cuales desaparecieron al eliminar los frutos y las plantas reiniciaron un rebrote normal de ramas.

Las tasas de producción de raíces finas del cacao bajo los dos tipos de sombra fueron estadísticamente iguales en el presente estudio. Además, no se observó diferencia entre los rendimientos del cacao bajo los dos tipos de sombra evaluados durante 13 años (1979-1992) (Morera *et al*, 1993). Estos hechos indican que bajo las condiciones ambientales del sitio de estudio y el manejo agronómicó que se ha dado a las parcelas, no importa el tipo de sombra (poró o laurel) que tenga el cacao.

El laurel presentó la TPRF más alta durante el período de estudio, pero con grandes diferencias entre periodos de muestreo (Fig. 6). Los valores más altos fueron observados cuando la humedad del suelo fue alta en octubre-noviembre

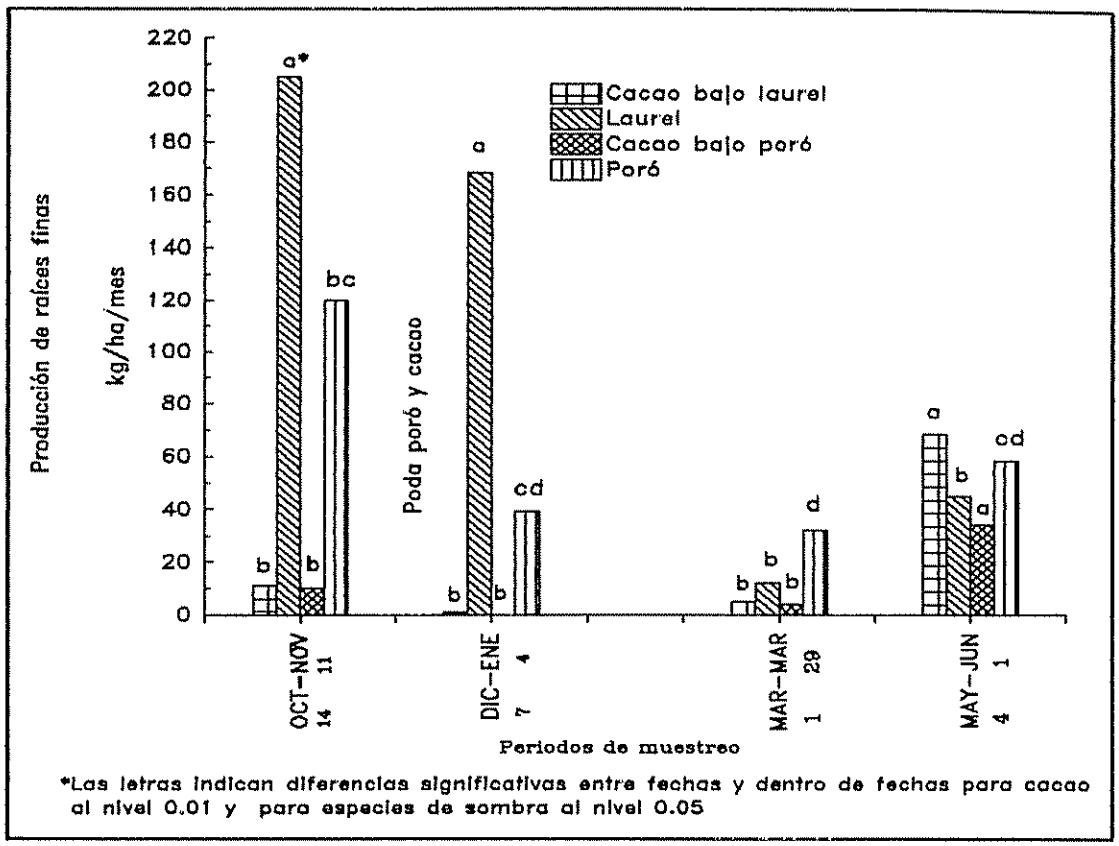


Figura 6 Tasas de producción de raices finas de laurel, cacao y poró en Turrialba, Costa Rica.

(Fig. 7) y el patrón del es claramente decreciente hacia el mes de marzo. Este comportamiento parece ser fenológico y el mínimo ocurre inmediatamente antes del pico de deposición de hojarasca del laurel, el cual fue en abril en 1993 (Fassbender y Beer, 1993). A pesar de que el aumento de la tasa de producción de raíces del laurel en el último período (mayo) no fue significativo respecto a marzo, pareció real ya que se notó el mismo comportamiento en todas las especies (Fig. 6). El aumento de las tasas de producción de raíces finas en mayo pudo ser causado por el efecto del aumento de humedad del suelo, al inicio de las lluvias (Fig. 7).

Las tasas de producción de raíces finas del poró tuvieron un patrón similar a las del laurel durante el período de estudio, aunque fueron mucho más bajas durante octubre-noviembre y diciembre-enero (Fig. 6).

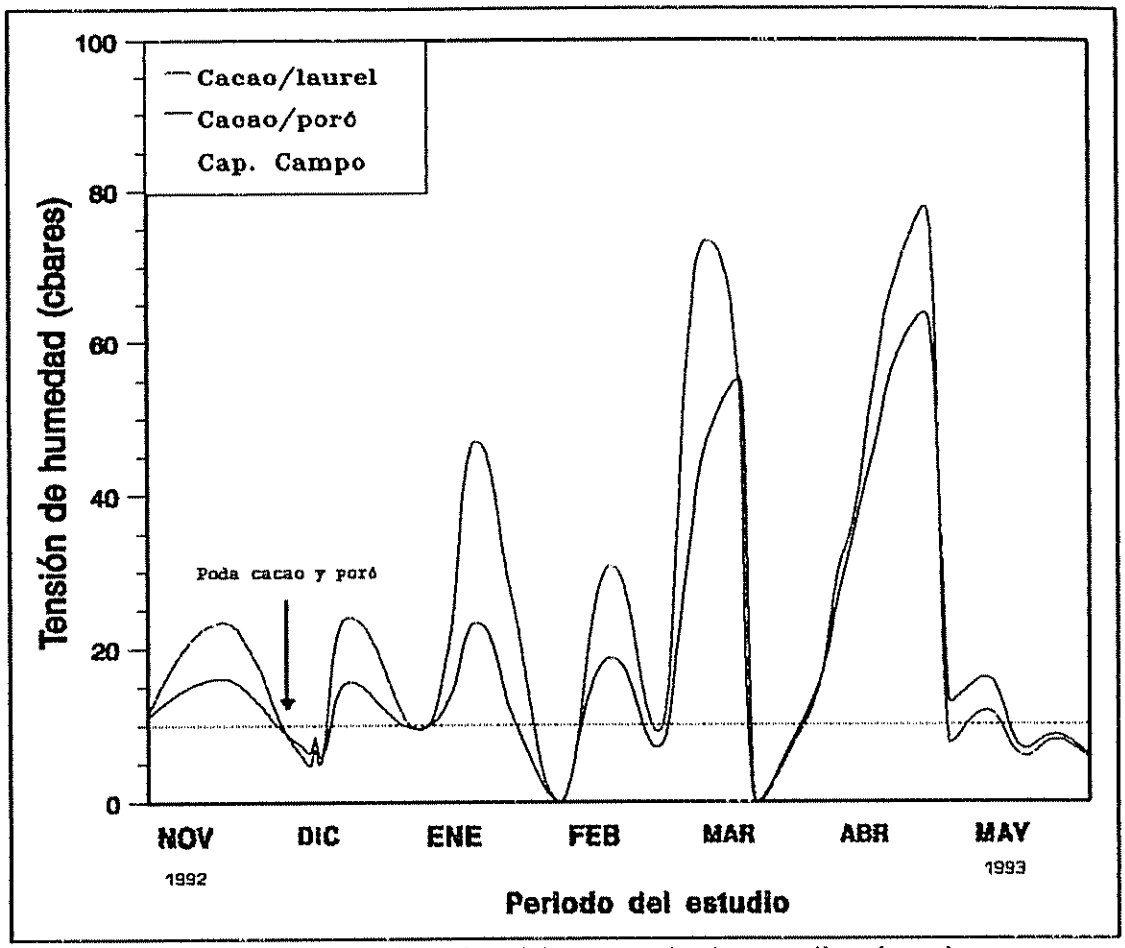


Figura 7 Tensión de humedad del suelo en los sistemas cacao/poró y cacao/laurel en el ensayo Central, CATIE, Costa Rica.

Después de la poda, la TPRF del poró fue menor que antes pero la diferencia no fue significativa (Fig. 6). La tensión de humedad del suelo en los dos períodos iniciales de muestreo fue similar (Fig. 7). La reducción en la tasa de producción de raíces del poró fué de 66%, mientras que la reducción del laurel en el mismo período fue del 18 % . El poró podado no es una especie caducifolia, por lo cual parece que la aparente reducción en su TPRF en el segundo período fue por lo menos en parte debida a la poda.

Al igual que en laurel, en el poró se observó un patrón de producción de raíces finas descendente hacia el mes de marzo (período seco) y en marzo no hubo diferencia entre el

comportamiento del laurel y el poró. Las diferencias entre las TPRF del poró en el período de reinicio de lluvias (mayo) y el período seco (marzo) no fueron significativas. Sin em[illegible] [illegible]e considerarse que al reinicio de las lluvias se observó aumento de las tasas de producción de todas las especies y el aumento de la tasa de cacao fue significativo (Fig. 6). Por lo tanto es probable que el aumento en las TPRF del poró y laurel sea real.

En un estudio realizado en Brasil (Kummerow *et al*, 1982), la actividad del sistema radicular fino del cacao se estimó por el número de ápices radiculares de crecimiento. Se observó un relativamente pequeño número de ápices de crecimiento en Enero, mes que fue muy seco. Las densidades de ápices en Marzo, mes con abundante precipitación, fueron altas. El comportamiento de la actividad de las raíces finas con respecto a la precipitación del cacaotal en Brasil, concuerda con las observaciones hechas en este estudio.

Si la tasa de producción de raíces se toma como criterio para evaluar la competencia por nutrimentos entre la especie de sombra y el cacao, se observa que el laurel es mucho más competitivo que el poró durante el período lluvioso. Esta observación concuerda con observaciones empíricas de agricultores que afirman que el laurel es un árbol más competitivo que el poró (Beer *et al*, 1990). Tambien apoya la hipótesis de que en ausencia de fertilización en este mismo sitio o en sitios con menor fertilidad, los rendimientos de cacao podrían ser mayores bajo poró que bajo laurel (Beer *et al*, 1990).

4.4.3 Tasas de renovación de raíces finas

Es importante hacer notar que ante la imposibilidad de identificar las raíces de cada especie y sortear la biomasa de raíces finas en raíces vivas y muertas, los cálculos de las tasas de [illegible]novación de raíces se hicieron dividiendo la

producción de raíces finas de cada sistema (suma de las dos especies) por el promedio de la BTRF (vivas + muertas) en cada período. Esto posiblemente nos conduce a una subestimación de las tasas de renovación de raíces finas de cada sistema. Por lo tanto se debería dar mayor importancia al valor relativo entre los dos sistemas que al absoluto.

4.4.3.1 **Período seco** (Enero - Abril)

Para este período se estimaron tasas de renovación de raíces finas de 0.07 para el sistema cacao/laurel y 0.16 para el sistema cacao/poró (Cuadro 2). Esto quiere decir que durante los cuatro meses del período seco, se renovó el 7 y 16 por ciento de las raíces finas de los sistemas cacao/laurel y cacao/poró respectivamente. Este hecho parece ser debido a que la mayor tensión de humedad del suelo y la defoliación afectaron más a la producción de raíces del laurel (Cuadro 2) comparado con poró.

Cuadro 2 Tasas de renovación de raíces finas de los sistemas cacao/laurel y cacao/poró durante 4 meses del período seco en Turrialba, Costa Rica.

SISTEMA	ESPECIE	PRF (kg/ha/mes)	BTRF (kg/ha)	TRRF
Cacao/laurel	Cacao	5	1000	[(5+12)*4]/1000= 0.07
	Laurel	12		
Cacao/poró	Cacao	4	925	[(4+32)*4]/925= 0.16
	Poró	32		

PRF = Producción de raíces finas
BTRF= Biomasa total de raíces finas
TRRF= Tasa de renovación de raíces finas

4.4.3.2 **Período húmedo** (Octubre-Diciembre, Mayo)

El período "húmedo" en la región normalmente abarca ocho meses (Mayo-Diciembre). Este estudio solo cubrió cuatro de los ocho meses. Durante los cuatro meses del período húmedo, se estimaron TRRF de 0.46 y 0.34 para los sistemas cacao/laurel y cacao/poró respectivamente (Cuadro 3). Esto quiere decir que durante los 4 meses estudiados del período

húmedo se renovó el 46 y 34 por ciento de las raíces finas de los sistemas cacao/laurel y cacao/poró respectivamente. Suponiendo que la TRRF sigue igual durante todos los 8 meses más húmedos del año, se podría prever que más del 90 % de las raíces finas del sistema cacao/laurel y 68 % de las del sistema cacao/poró se renovarian en cada estación húmeda.

Cuadro 3 Tasas de renovación de raíces finas de los sistemas cacao/laurel y cacao/poró durante 4 meses del período húmedo en Turrialba, Costa Rica.

SISTEMA	ESPECIE	PRF (kg/ha/mes)	BTRF (kg/ha)	TRRF
Cacao/laurel	Cacao	27	1439	[(27+139)*4]/1439 = 0.46
	Laurel	139		
Cacao/poró	Cacao	15	1030	[(15+72)*4]/1030 = 0.34
	Poró	72		

PRF = Producción de raíces finas
BTRF= Biomasa total de raíces finas
TRRF= Tasa de renovación de raíces finas

En el período húmedo la producción de raíces fue 10 y 2.5 veces mayor que la del período seco para los sistemas cacao/laurel y cacao/poró respectivamente (Cuadros 2 y 3). La PRF del sistema cacao/laurel en el período húmedo fue casi el doble de la estimada para el sistema cacao/poró. Posiblemente este comportamiento se debe a que el laurel recupera en este período las raíces que perdió en la época seca.

4.4.3.3 Tasa anual de renovación de raíces finas

Es importante tener en cuenta que el valor estimado de TRRF anual, es producto de una extrapolación. Los valores estimados fueron 0.99 para el sistema cacao/laurel y 0.84 para el sistema cacao/poró; es decir que la renovación de raíces finas en el sistema cacao/laurel es más rápida que la del sistema cacao/poro. Una de las explicaciones posibles es que en el sistema cacao/poró se presentan menores oscilaciones en la tensión de humedad del suelo durante el

período seco que las que se registran en el sistema cacao/laurel. La relativa uniformidad de la humedad del suelo bajo el sistema cacao/poró puede favorecer la mayor longevidad de raíces de las especies de este sistema.

Para calcular la productividad primaria neta en estas mismas parcelas a la edad de 10 años (Beer *et al*, 1990) se asumieron tasas de renovación de 1.0 para los dos sistemas (raíces < 5 mm), la cual resulta exagerada en vista de que las raíces gruesas tienen tasas de renovación menores que las finas. Las tasas de renovación calculadas en este estudio para raíces < 2 mm fueron cercanas a 1 (Cuadro 4).

Cuadro 4 Tasas anuales estimadas de renovación de raíces finas (TRRF) de los sistemas cacao/laurel y cacao poró.

	Epoca seca (4 meses)			Epoca húmeda (8 meses)			TRRF‡
Sistema	PRF(1)	BTRF(2)	TRRF(3)	PRF(1)	BTRF(2)	TRRF(3)	anual
Cac/lau	68	1000	0.07	1328	1439	0.92	0.99
Cac/por	144	925	0.16	696	1030	0.68	0.84

1 Producción de raíces finas durante la época (4 o 8 meses)
2 Biomasa total de raíces finas de 1 muestreo para la época seca y 3 para la húmeda
3 TRRF Epoca seca (Cuadro 2). TRRF Epoca húmeda x 2 (Cuadro 3)
‡ TRRF anual = TRRF(3) Epoca seca + TRRF(3) Epoca húmeda

4.4.4 Aporte anual de nutrimentos a partir de la renovación de raíces finas *vs* aporte anual de nutrimentos a partir de la hojarasca

Se hizo esta comparación para tratar de establecer la proporción e importancia relativa con las que cada fracción (hojarasca y raíces finas) participa en el ciclo de los nutrimentos en los sistemas agroforestales cacao/poró y cacao/laurel.

Para estimar el aporte anual de las raíces finas que se renovan en un año en cada sistema se utilizó el siguiente procedimiento: 1º Se calculó la PRF anual de cada especie en

cada sistema (Cuadros 2 y 3). Con base en estos valores, se calcularon las proporciones con las que cada especie participa en la PRF anual de cada sistema. Las proporciones fueron 17 % de cacao y 83 % de laurel (cacao/laurel) y 16 % de cacao y 84 % de poró (cacao/poró); 2º Utilizando la TRRF anual estimada para cada sistema (Cuadro 4), se calculó la BTRF renovada en un año; 3º Utilizando las proporciones de cada especie (Paso 1º) y la BTRF renovada anualmente en cada sistema (Paso 2º), se calculó la BTRF renovada por especie en cada sistema. 4º Con la información de concentración inicial de nutrimentos en el tejido radicular de cada especie (Ver anexo 1A) y la BTRF renovada anualmente de cada especie (Paso 3º), se calcularon las cantidades de nutrimentos (N, P, K, Ca, Mg) que son aportados anualmente por las raíces finas a cada sistema (Cuadro 5).

Para calcular el aporte de nutrimentos de la hojarasca en el reciclaje de nutrimentos de cada sistema (Cuadro 5), se utilizó información de biomasa y contenido de nutrimentos de la hojarasca natural (cacao, laurel y poró) y de podas (cacao y poró) en el mismo sitio y durante el mismo período de estudio (Fassbender y Beer, 1993).

El aporte total de N, P, K en residuos (hojarasca, podas, raíces finas) es el doble en el sistema cacao/poró, 50 % más en el caso de Ca, pero hay poca diferencia entre sistemas para Mg (Cuadro 5), a pesar de la mayor entrada de residuos al sistema cacao/poró. El mayor contenido de Mg en la hojarasca (Vilas Boas, 1990) y en las raíces de laurel (Anexo 1A) explican en parte este comportamiento.

En el sistema cacao/poró el porcentaje del aporte de las raíces finas localizadas en los primeros 15 cm del suelo, oscila en un rango entre 3-5 % , mientras en el sistema cacao/laurel se encuentra entre 5-11 %. En otras palabras el porcentaje de aporte de las raíces finas al ciclo de

nutrimentos en el sistema cacao/laurel es más del doble que en el sistema cacao/poró, excepto para Ca (Cuadro 5). La diferencia entre los valores relativos de aporte de nutrimentos en cada sistema fue causada principalmente por la gran entrada de biomasa de las podas del poró (Cuadro 5). Por lo tanto, se podría hipotetizar que en sistemas agroforestales de cacao/poró, en los cuales no se realice la poda del poró, el aporte de nutrimentos a partir de las raíces finas podría ser similar al aporte de estas en el sistema cacao/laurel.

Cuadro 5. Aporte anual (1992-93) de N, P, K, Ca y Mg (kg/ha/año) a partir de la biomasa de raíces finas (0-15 cm), hojarasca natural y de podas en los sistemas cacao/laurel y cacao/poró en Turrialba, Costa Rica.

Sistema	Componente	Biomasa	N	P	K	Ca	Mg
Cacao/laurel	Hojarasca natural‡	7,439	141	11	67	147	54
	Hojarasca podas‡	3,119	38	5	43	34	16
	Raíces finas	1,293	21	2	14	9	8
	TOTAL	11,851	200	18	124	190	78
	Aporte de las r. finas (%)	11	11	11	11	5	10
Cacao/poró	Hojarasca natural‡	6,228	132	9	37	142	42
	Hojarasca podas‡	13,972	255	28	178	109	42
	Raíces finas	836	20	2	11	7	3
	TOTAL	21,036	407	39	226	258	87
	Aporte de las r. finas(%)	4	5	5	5	3	3

‡ Fassbender y Beer (1993)

En estas parcelas de cacao/poró, se han reportado pérdidas por lixiviación de Ca y Mg de 27 y 20 kg ha^{-1} a^{-1} respectivamente, *vs* 6 kg ha^{-1} a^{-1} de cada elemento en el sistema cacao/laurel (Imbach *et al*, 1989). La pérdida anual por lixiviación de Ca y Mg del sistema cacao/poró representa el 10 y 23 % respectivamente del aporte anual de estos elementos por parte de los residuos aéreos (hojarasca y residuos de podas) más de la renovación de raíces finas

(Cuadro 5). La salida anual por lixiviación de Ca y Mg en el sistema cacao/laurel representa solo el 3 y 8 %, respectivamente, de los aportes de estos elementos por residuos aéreos y renovación de raíces (Cuadro 5). Las pérdidas por lixiviación de Ca y Mg reportadas en el sistema cacao/poró, probablemente provienen de los residuos de la poda, especialmente de los del poró ya que estos causan la diferencia en la cantidad de nutrimentos que entran a los dos sistemas. La causa de esta pérdida podría atribuirse a las rápidas tasas de liberación de estos elementos a partir de la hojarasca (Vilas Boas, 1990) y de las raíces finas del poró (Vease capítulo 5). Por otra parte, en la hojarasca del sistema cacao/laurel (Vilas Boas, 1990) y en las raíces del laurel en las que se observó tendencia a la acumulación de Ca y liberación lenta de Mg, se reportaron bajas pérdidas por lixiviación de estos elementos (Imbach, *et al*, 1989).

En un estudio preliminar de la distribución vertical de las raíces finas hasta 60 cm de profundidad, se estimó que en los primeros 15 cm del suelo se encontraban el 60 % de las raíces finas del sistema cacao/laurel y 50 % de las del sistema cacao/poró (Muñoz, Datos no publicados). Por lo tanto si suponemos tasas de renovación similares para las raíces entre 15 y 60 cm los valores relativos de aporte de las raíces finas en cada sistema serían más altos de lo presentado en el Cuadro 5. Además, se debe tener en cuenta que en el presente estudio no se estimaron las cantidades de nutrimentos aportados en los exudados de las raíces y micorrizas.

4.5 CONCLUSIONES GENERALES

La biomasa total de raíces finas en ambos sistemas es relativamente constante y es mas alta en el sistema cacao/laurel que en cacao/poró. Sin embargo esta estabilidad podría esconder cambios en las proporciones de raíces vivas y muertas y/o una producción y mortalidad continua. Hubo tendencia a aumento de biomasa de raíces finas con la iniciación de las lluvias.

La producción de raíces finas fue más alta en el sistema cacao/laurel (1396 kg ha^{-1} a^{-1}) que en el sistema cacao/poró (840 kg ha^{-1} a^{-1}). La producción en ambos sistemas es más alta en la época lluviosa que en la época seca. Entre especies la producción fue: laurel > poró > cacao. La producción del laurel estuvo entre 12-205 kg ha^{-1} mes^{-1}. La producción del poró (32-120 kg ha^{-1} mes^{-1}) fue relativamente constante y la poda la afectó poco. La producción de raíces finas de cacao en los dos sistemas varió entre 0-68 kg ha^{-1} mes^{-1}. En cacao no se observó diferencia entre sistemas. Las mayores producciónes del laurel y el poró se observó en la época húmeda. Mientras que el cacao presentó la mayor producción al inicio de las lluvias. En el período seco hubo baja producción para todas las especies.

La renovación anual de raíces fue mayor en el sistema cacao/laurel (1.08) que en el sistema cacao/poró (0.84). En cuatro meses de la época seca se presentaron las tasas de renovación de raíces finas más bajas; 0.07 y 0.16 en los sistemas cacao/laurel y cacao/poró, respectivamente. En cuatro meses de la época húmeda se observaron las más altas, 0.46 y 0.34 en los sistemas cacao/laurel y cacao/poró, respectivamente.

El porcentaje de nutrimentos aportados a partir de la renovación de las raíces finas fue mayor en el sistema

cacao/laurel que en el sistema cacao/poró. En el sistema cacao/laurel varió entre 5-12 %, dependiendo del elemento. En el sistema cacao/poró varió entre 3-5 %. Sin embargo, en términos absolutos contribuyen aproximadamente con la misma cantidad de nutrimentos en cada sistema, con excepción del Mg. El mayor aporte de Mg a partir de la renovación de raíces en el sistema cacao/laurel fue debida al mayor contenido inicial de Mg en las raíces de laurel. En el sistema cacao/poró, el porcentaje de aporte de nutrimentos a partir de la renovación de las raíces finas fue opacado por la gran entrada de nutrimentos de los residuos de la poda de poró.

Para determinar los períodos en los cuales la fertilización puede ser más efectiva, se deben realizar estudios que determinen en que momento se presenta la mayor proporción de raíces vivas de la especie a la que va dirigida la fertilización. Además se deben realizar estudios en la época húmeda (mayo-diciembre) para detectar los períodos de máxima producción de raíces finas. Posiblemente con prácticas culturales como la poda, la ocurrencia de estos períodos se pueda distanciar de manera que la competencia por nutrimentos de las especies se distribuya en el tiempo.

Una de las formas de mejorar el manejo del sistema cacao/poró podría ser podando el poró muy temprano al inicio de las lluvias de manera que se reduzca su competencia con el cacao. Esto ocasionaría posiblemente una disminución en la tasa de producción de raíces del poró además de reducir la competencia por luz y daría la oportunidad al cacao de aprovechar mayor cantidad de los recursos de la biomasa de la hojarasca y de las raíces muertas acumuladas durante el período seco. La fertilización del cacao a mitad del año debería hacerse inmediatamente después de la poda del poró para aprovechar la disminución de competencia. La poda del cacao podría hacerse más tarde si es necesario. Así mismo se

puede sugerir que la fertilización de mitad de año (junio-julio) del cacao bajo laurel se debería hacer al inicio de las lluvias para aprovechar la poca competencia del laurel y posteriormente, en el período lluvioso, hacer la poda del cacao si es necesario.

El Ca al no presentar el fenómeno de fijación, como P y K es muy movil, lo que lo hace facilmente lixiviable especialmente en regiones lluviosas (Fassbender y Bornemissa, 1987). Debido a la rápida liberación a partir de la hojarasca (Vilas Boas, 1990) y de las raíces finas de poró (Ver capítulo 5), pueden ocurrir pérdidas de este elemento como las reportadas en estudios anteriores (Imbach, 1989). La poda del poró en este ensayo puede disminuir las reservas de Ca. Al escoger el tipo de árbol que se incorporará a un sistema agroforestal, se deben tomar en cuenta las condiciones de fertilidad y reservas de nutrimentos en el suelo, en conjunto con las características de la especie que se piensa usar.

5 DESCOMPOSICION DE LAS RAICES FINAS Y LIBERACION DE NUTRIMENTOS

5.1 INTRODUCCION

El proceso de descomposición de la materia orgánica es de gran importancia en cualquier ecosistema, ya que permite la reutilización de los nutrimentos acumulados en el material orgánico muerto. La velocidad de descomposición y por lo tanto la liberación de nutrimentos debido a este proceso dependen de: factores climáticos y del suelo; de las características del material vegetal; y de los organismos descomponedores. Los factores climáticos que más influyen sobre la descomposición son la humedad y la temperatura (Fabiao *et al*, 1985). Por lo tanto, en el trópico donde la temperatura del suelo es relativamente alta y constante, la humedad es el factor climático que más influye sobre la descomposición (Anderson y Swift, 1983; Fabião *et al*, 1985). Las características del material vegetal que más pueden afectar la tasa de descomposición de la materia orgánica vegetal son: dureza física, contenido de lignina, contenido de nutrientes, substancias secundarias, masa y tamaño de partículas (Anderson y Swift, 1983).

La recirculación de los nutrimentos de las raíces finas y la hojarasca ocurre cuando hay descomposición. En algunos ecosistemas se ha estimado mayor aporte de materia orgánica al suelo a partir de las raíces finas que de la hojarasca (Persson, 1979). El conocimiento de las tasas de descomposición de las raíces finas en sistemas agroforestales es de gran importancia ya que al analizarlas en conjunto con variables como la producción y biomasa total de raíces finas y las variables pertenecientes a la parte aérea, permiten conocer la dinámica de los nutrimentos y por lo tanto tratar de asegurar la sostenibilidad de un sistema de producción. (Fassbender, 1993).

Además el conocimiento de las relaciones entre los componentes que participan activamente en la dinámica de los nutrimentos permitirá diseñar sistemas agroforestales que utilicen los recursos más eficiente y sostenidamente. En este capítulo se presentan los resultados de un estudio de la descomposición y liberación de los nutrimentos a partir de las raíces finas de los sistemas agroforestales de cacao con sombra de laurel o de poró.

5.2 MATERIALES Y METODOS

Este estudio fue realizado en el Ensayo Central de Cultivos Perennes establecido en 1977 en La Montaña, CATIE (Véase capítulo 3).

5.2.1 Tipo de muestras

En este estudio se utilizó una modificación del método de bolsas de descomposición (Steen, 1985; Noordwijk, 1992). Se colocaron las raíces en bolsas de malla de nylon con abertura de 5 mm que se colocaron en el suelo en una ranura de 15 cm de profundidad y 3 cm de ancho abierta con un machete. Luego, con la ayuda de una regla plástica se empujó la bolsa que contenía las raíces, dentro de la ranura y posteriormente se retiró la regla (Fig. 8). Finalmente se abrió otra ranura paralela a la primera y se empujo el suelo hacia la que contenía la bolsa con las raíces. De esta manera se logró un buen contacto entre la bolsa, las raíces y el suelo. Las bolsas enterradas se cubrieron con hojarasca para simular las condiciones naturales.

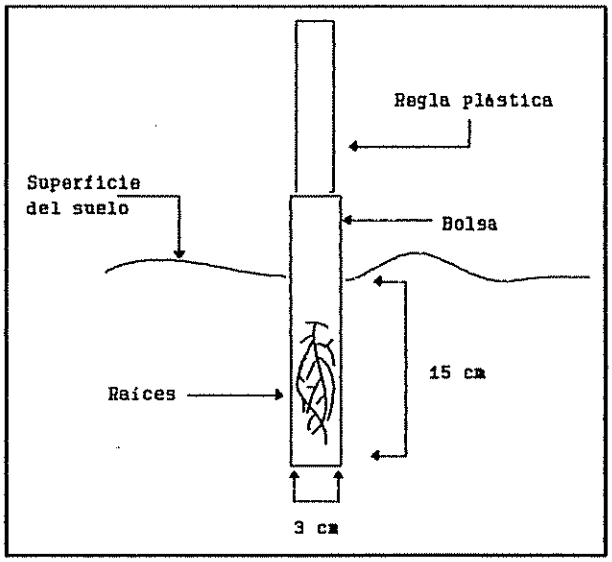


Figura 8. Método de colocación de las bolsas de descomposición de raíces finas en el suelo.

Las raíces vivas (diámetro <2 mm para cada especie), se recolectaron en las áreas de borde, se lavaron, se identificaron para colocarlas en la parcela correspondiente y se secaron al ambiente por 72 horas. Dentro de cada bolsa se colocaron 0,6 g (0.3 g de cacao + 0.3 g de poró o laurel) de raíces finas secadas al ambiente. Muestras de las raíces de cada especie fueron secadas en un horno a 65°C, hasta peso constante (± 0.001 g), para calcular la cantidad de materia seca de las raíces secadas al

ambiente. En la época húmeda, la cantidad aproximada de materia seca puesta en las bolsas fue de 0.22, 0.24 y 0.16 g de cacao, laurel y poró respectivamente. En la época seca, aproximadamnete 0.25 g de cada especie.

Antes de colocar las raíces en el suelo fueron humectadas para que recuperaran la flexibilidad perdida por el secamiento y así evitar una posible fuente de error debida a la pérdida de raíces durante su manipulación en el campo.

5.2.2 Distribución de las muestras en espacio y tiempo

El estudio se realizó en dos épocas, una generalmente "lluviosa" (octubre-enero) y otra generalmente "seca" (febrero-mayo) (Figura 3). Al inicio de cada época se colocaron 72 bolsas en cada sistema (Cuadro 6). Dentro de las áreas de muestreo de las parcelas útiles de cada tratamiento, se aleatorizó la posición de seis filas (3 por cada área de 36 m^2) y dentro de cada fila se colocaron 6 bolsas de descomposición cada 20 cm (Figura 9).

Cuadro 6. Número de muestras utilizadas para estimar la descomposición de las raíces de laurel, poró y cacao.

Método de muestreo.	Variable estimada	Bloques	Tratam.	Nº de Muestras x parcela y fecha	Nº de Fechas	Total
Bolsas descomposición.	Tasas de descomposición.	2	2	6	12*	288

* 6 en el periodo "lluvioso" y 6 en el "seco".

Para estudiar la liberación de nutrimentos durante el proceso de descomposición, las bolsas de la época "lluviosa" se retiraron a intervalos de 1, 2, 4, 6, 12 y 25 semanas después de la colocación y durante la época "seca" a las 1, 2, 4, 6, 12 y 18 semanas (Figura 3). En cada una de las fechas se retiraron doce bolsas aleatoriamente de cada sistema.

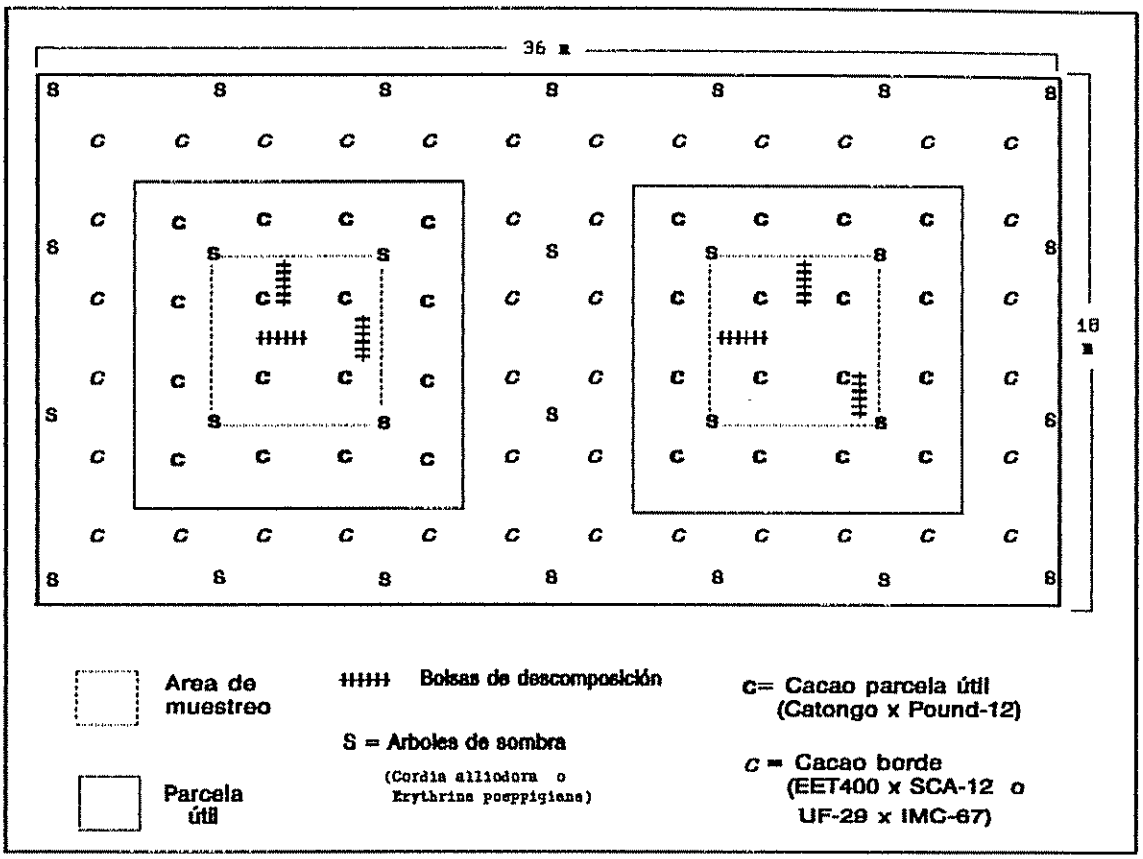


Figura 9. Localización de las bolsas de descomposición de raíces finas de cacao con laurel o poró, en el Ensayo Central, CATIE, Costa Rica.

5.2.3 Análisis del contenido de nutrimentos

El mismo día de retiradas las muestras del suelo, fueron lavadas con agua corriente sobre un tamiz de 0.5 mm de malla, separadas por especie y colocadas al horno a 65°C hasta que quedaron a peso constante. Posteriormente se pesaron y se molieron para realizar análisis de tejidos. Para el análisis químico de las concentraciones de N, P, K, Ca y Mg contenidos en el tejido radicular, se hizo una muestra compuesta de las raíces de cada especie para cada tratamiento en cada bloque por cada fecha. En cada fecha se calculó además un factor de corrección en cada fecha para suelo adherido a las raíces, siguiendo el procedimiento de calcinación descrito en la sección 4.2.2 .

El contenido de N fue determinado por el método Kjehldal con digestión en ácido sulfúrico titulado con ácido bórico.

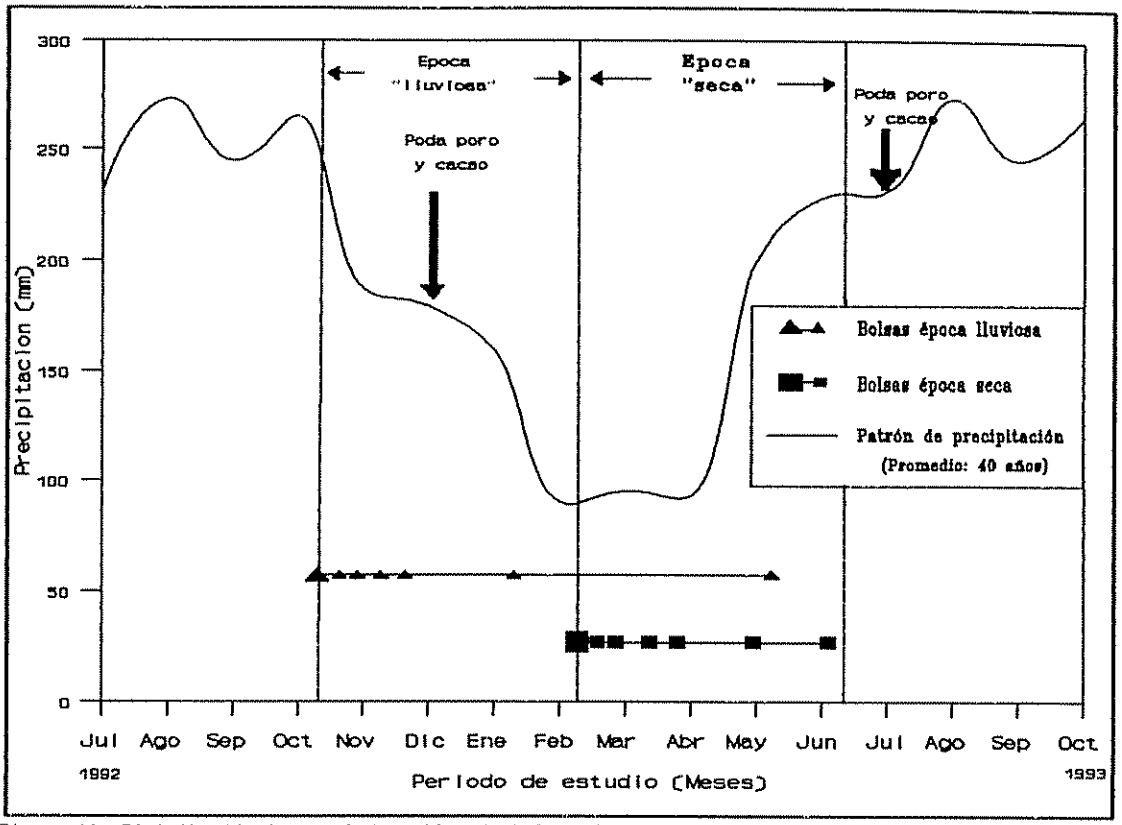


Figura 10. Distribución temporal de retiro de bolsas de descomposición de raíces finas con respecto a precipitación y podas

El contenido de P se determinó por colorimetría utilizando una longitud de onda de 660 nm. El K, Ca y Mg fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica en la solución de la digestión nitroperclórica (Díaz-Romeu y Hunter, 1982). Los contenidos iniciales de nutrimentos en el tejido de las raíces en las dos épocas estan consignados en el anexo 1A.

5.2.4 Análisis estadístico

Los resultados de biomasa y de nutrimentos están con base en el peso del material libre de cenizas (biomasa corregida * % de nutrimento = cantidad de nutrimento). Se utilizó el procedimiento REG de SAS para ajustar las medias del peso seco remanente de las raíces de cada especie y su contenido de nutrimentos en cada fecha, expresados como porcentaje del peso inicial de la muestra, a un modelo de

regresión exponencial simple cuyo modelo general (Gómez y Gómez, 1984) es:

$$Y = A\ e^{-bt}$$

Donde:

Y = porcentaje de peso seco remanente

A = peso seco inicial (intercepto con el eje Y)

e = base de los logaritmos naturales

b = coeficiente de regresión

t = tiempo en semanas

Para obtener la forma linealizada del modelo original se aplicó logaritmo natural quedando:

$$\ln Y = \ln A - bt$$

5.3 RESULTADOS Y DISCUSION

5.3.1 Pérdida de peso de las raíces finas por descomposición

En la época húmeda, la pérdida de peso fue explicada por el modelo exponencial, el cual fue altamente significativo para todas las especies (Fig. 11 y anexo 2A). Al final del período húmedo (semana 25), se observaron pérdidas de 43 % para las raíces de laurel y cacao bajo poró; 38 % para cacao bajo laurel y 85 % para poró. Tomando en cuenta que durante el período de estudio la humedad del suelo en el sistema cacao/poró fue mayor (Fig. 7), se pudo esperar que la tasa de descomposición de las raíces de cacao en ese sistema fuera mayor que la del cacao bajo laurel. Sin embargo la diferencia fue escasa (Fig. 12). Además parece que el asocio de las raíces de cacao con material de rápida descomposición (raíces de poró) no tuvo efecto sobre su descomposición.

En la época seca, las dos últimas bolsas del estudio se retiraron del suelo cuando se había reiniciado el período de lluvias. Por lo tanto, es posible que se haya acelerado el proceso de descomposición de las raíces a partir de la semana 9ª (Fig. 12). La pérdida de peso de las raíces de todas las especies en el período seco, fue explicada satisfactoriamente por el modelo exponencial. Después de 18 semanas de descomposición en la época "seca", se observó que no hubo diferencia en la pérdida de peso de las raíces del cacao en los dos sistemas (24 %). Las raíces del laurel perdieron el 40 % y las del poró el 71 % de su peso inicial en esta época.

Después de 18 semanas de descomposición, las pérdidas en la época seca fueron 10-15 % menos que en la época lluviosa con la excepción de laurel que tuvo pérdidas similares en ambas épocas. Las raíces del cacao perdieron menos peso en las dos épocas, a pesar de presentar una alta proporción de raíces de pequeño diámetro. Su relativamente mayor

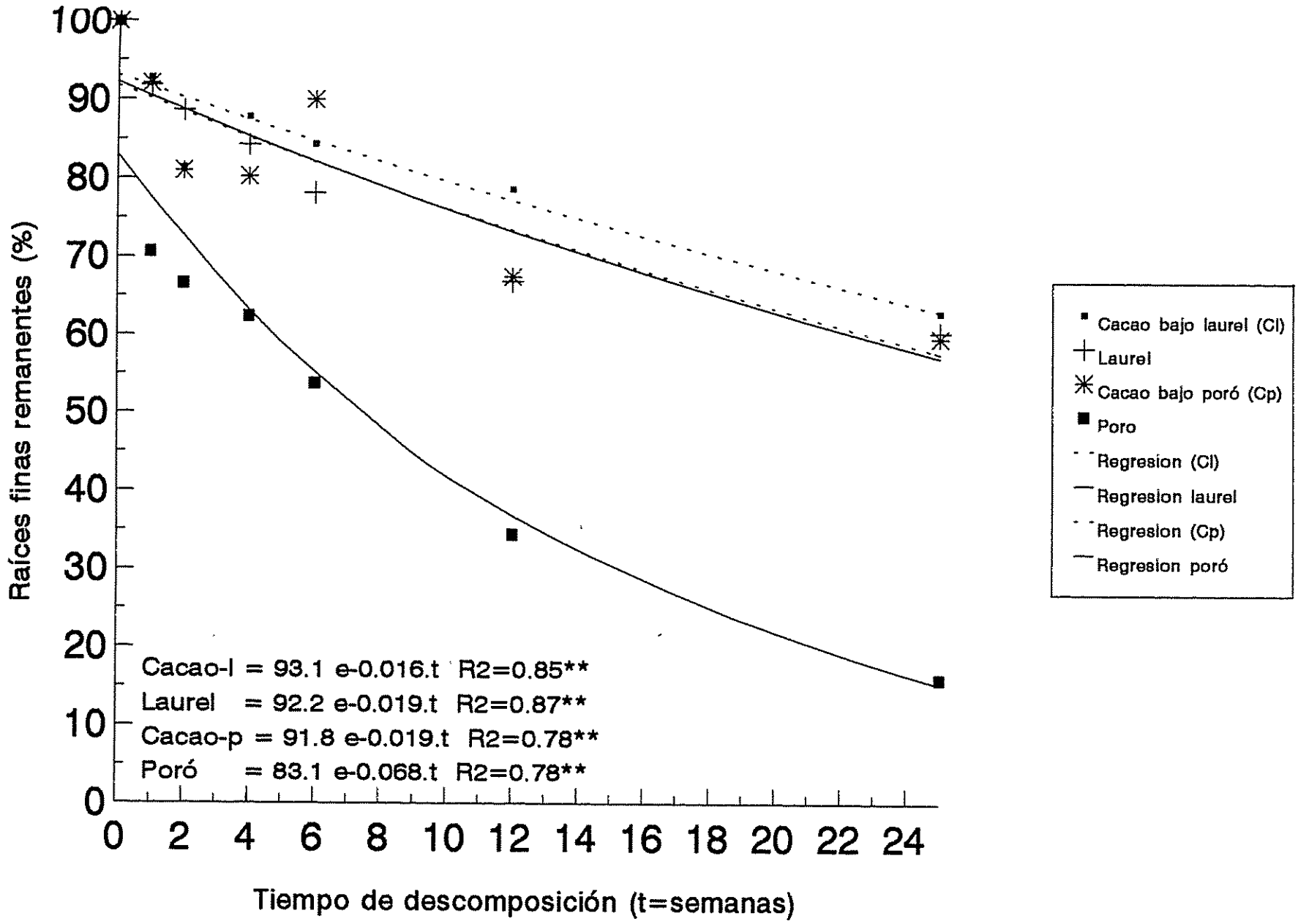


Figura 11. Tasa de descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época húmeda en Turrialba, Costa Rica.

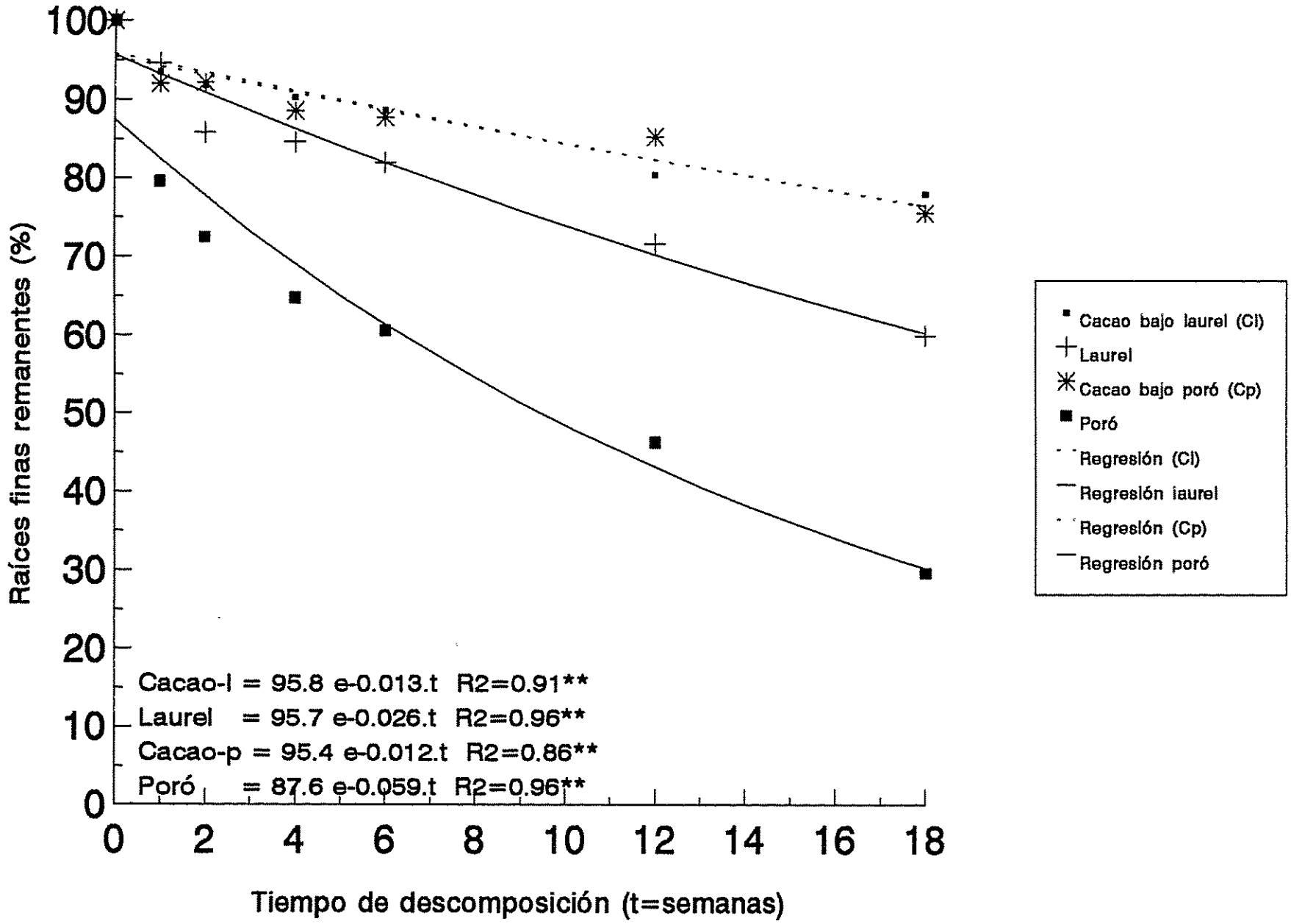


Figura 12. Tasa de descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época seca en Turrialba, Costa Rica.

resistencia a la descomposición se observó también en su follaje (Vilas Boas, 1990). La alta tasa de pérdida de peso de las raíces de poró concuerda con altas tasas de pérdida de peso de su hojarasca reportadas en estudios anteriores (Heuveldop *et al,* 1988; Vilas Boas, 1990) hechos en el mismo sitio.

Las tasas de descomposición de raíces finas estuvieron relacionadas con los contenidos iniciales promedios de N de 2.54, 1.71 y 1.45 % para poró, laurel y cacao. Por lo tanto se puede sugerir que al igual que en hojarasca de bosques (Anderson y Swift, 1983) el contenido de N en las raíces finas podría determinar su tasa de descomposición siempre y cuando haya humedad en el suelo. En el presente estudio se observó que en la época húmeda, la correlación entre pérdida de peso y liberación de N fue más alta que en la época seca. Se ha reportado que la liberación de N está muy relacionada con la descomposición de la materia orgánica debido a que el N esta unido al C por enlaces covalentes (Vitousek y Sanford, 1986).

En la época húmeda, la correlación entre pérdida de peso y liberación de nutrimentos de las dos especies de sombra estuvo muy asociada y generalmente más alta de lo observada para cacao (Cuadro 7). La excepción fue el K, que fue el que más rápido salió de las raíces de todas las especies. La relación entre descomposición y liberación de nutrimentos de las raíces de cacao fue similar en los dos sistemas.

La descomposición rápida y por lo tanto liberación rápida de nutrimentos puede ser una ventaja cuando ocurre en el momento en que los cultivos presentan mayor demanda (Haggar *et al*, 1993; en prensa). Aunque puede ser una desventaja en suelos donde haya riesgo de pérdida de nutrimentos por lixiviación (Benites, 1990). En este último caso, tal vez sería preferible tener los nutrimentos

acumulados en la materia orgánica en descomposición y que a partir de estas fueran liberados lentamente (Haggar *et al*, 1993; en prensa).

Cuadro 7. Correlación entre pérdida de peso seco y liberación de nutrimentos a partir de la descomposición de las raíces finas de laurel, poró y cacao en la época húmeda en Turrialba, Costa Rica.

Especie	N	P	K	Ca	Mg
ºCac-l	0.95 **	0.65 *	0.43 ns	0.89 **	0.67 **
Laurel	0.94 **	0.90 **	0.55 ns	0.57 *	0.85 **
ºCac-p	0.94 **	0.70 **	0.49 ns	0.89 **	0.79 **
Poró	0.99 **	0.92 **	0.73 **	0.88 **	0.85 **

º(Cac-l, Cac-p = cacao bajo laurel o poró respectivamente)

En un estudio realizado en Yurimaguas, Perú (Palm y Sánchez, 1989; citados por Benites, 1990), se observó que a pesar de la rápida descomposición y alta tasa de liberación de nutrimentos de *Erythrina sp.*, los rendimientos de los cultivos a los cuales se les aplicó el "mulch" de sus hojas, rindieron menos que los cultivos bajo "mulch" de *Inga edulis*. Esta última especie tuvo descomposición más lenta debida a altos contenidos de lignina y componentes polifenólicos.

Cuando se considera cualquiera de los elementos (N, P, K, Ca, Mg) analizados en la época seca, las raíces de cacao bajo los dos tipos de sombra y las de laurel presentaron similares coeficientes de correlación entre pérdida de peso y la liberación del elemento. Con la excepción de Mg, estos coeficientes siempre fueron más bajos que en el caso de las raíces de poró. Las raíces de poró fueron las que más peso perdieron en las 2 épocas de observación (húmeda y seca) y la pérdida de peso estuvo fuertemente correlacionada con la liberación de nutrimentos en cada época (Cuadros 7 y 8). Se reportó (Vilas Boas, 1990) una tasa de pérdida de peso similar de la hojarasca del sistema cacao/poró en esta misma época, a la pérdida de peso de las raíces de poró en el

presente estudio, aunque en esa ocasión se analizó por sistema y no por especie.

Cuadro 8. Correlación entre pérdida de peso seco y liberación de nutrimentos a partir de la descomposición de las raíces finas de laurel, poró y cacao en la época seca en Turrialba, Costa Rica.

Especie	N	P	K	Ca	Mg
ºCac-l	0.50 ns	0.81 **	0.67 **	0.33 ns	0.92 **
Laurel	0.62 *	0.89 **	0.61 *	-0.16 ns	0.94 **
ºCac-p	0.53 ns	0.81 **	0.65 *	0.14 ns	0.90 **
Poró	0.97 **	0.92 **	0.71 **	0.93 **	0.77 **

º(Cac-l, Cac-p = cacao bajo laurel o poró respectivamente)

El comportamiento diferente de poró puede deberse a que sus raíces finas muertas son más susceptibles a descomponerse que las de las otras especies, aún en más bajos contenidos de humedad en el suelo.

5.3.2 Liberación de Nitrógeno

Es importante aclarar que se usará el término "liberación" para significar la cantidad del elemento (N, P, K, Ca, Mg) que ha perdido la biomasa de raíces finas debido al proceso de descomposición y en ningún momento se debe interpretar como disponibilidad de los elementos para los árboles o cultivos. También hay que tomar en cuenta que en este estudio se usaron raíces recién cortadas. Por lo tanto, si hay reabsorción de nutrimentos antes de la muerte de las raíces finas, el contenido inicial de las raíces muertas podría estar sobreestimado. Aunque en estudios realizados en pinos en Australia se encontró poca evidencia de que esto ocurra (Nambiar, 1987).

En la época húmeda, la liberación de N a partir de las raíces de todas las especies fue explicada por el modelo exponencial (Fig. 13). Sin embargo, el patrón de liberación de N del cacao y el del laurel fue casi lineal, mientras que el patrón del poró fue claramente exponencial. Al cabo de las

25 semanas del período "lluvioso" se liberó un 87, 45, 38 y 43 % del contenido inicial de N de las raíces de poró, cacao bajo poró, laurel y cacao bajo laurel, respectivamente. Las tasas estimadas de liberación de N a partir de la hojarasca de las mismas especies a las 9 semanas en la época lluviosa (Vilas Boas, 1990) mostraron valores de 45, 18, 22 y 20 %, respectivamente. Los anteriores valores de liberación fueron similares a los de raíces finas en el presente estudio. Lo que sugiere un patrón de liberación de N similar a partir de la descomposición de las raíces finas y la hojarasca de las cuatro especies en la época húmeda.

En la época seca, la liberación de N de las raíces del cacao bajo los dos sistemas no fue exponencial. Para laurel fue significativo pero con un ajuste muy bajo y fue altamente significativo solamente para las raíces de poró (Fig. 14 y anexo 2A). Para cacao y laurel se notó una liberación de aproximadamente el 15 % después de la primera semana; una lenta acumulación de N hasta la sexta semana; y de nuevo una lenta liberación entre las semanas 6 y 18. El cambio en la humedad del suelo pudo causar este comportamiento.

Al igual que en la época húmeda, la mayor liberación de N en la época seca fue a partir de las raíces del poró. Después de 18 semanas el poró liberó 74 %, el cacao 25 %, y el laurel 40 % del N inicial. Al comparar las cantidades de N liberadas por cada especie a las 18 semanas de cada época se puede deducir que la mayor humedad del suelo en el período lluvioso favoreció la descomposición y por lo tanto la liberación de N de las raíces de todas las especies excepto de las del laurel. No se encontró evidencia de que la mayor liberación de N desde residuos de poró acelerara la descomposición de los residuos de cacao.

Si las raíces finas de poró mueren después de una poda semestral, como se ha sugerido (Russo, 1984), 80% del N en

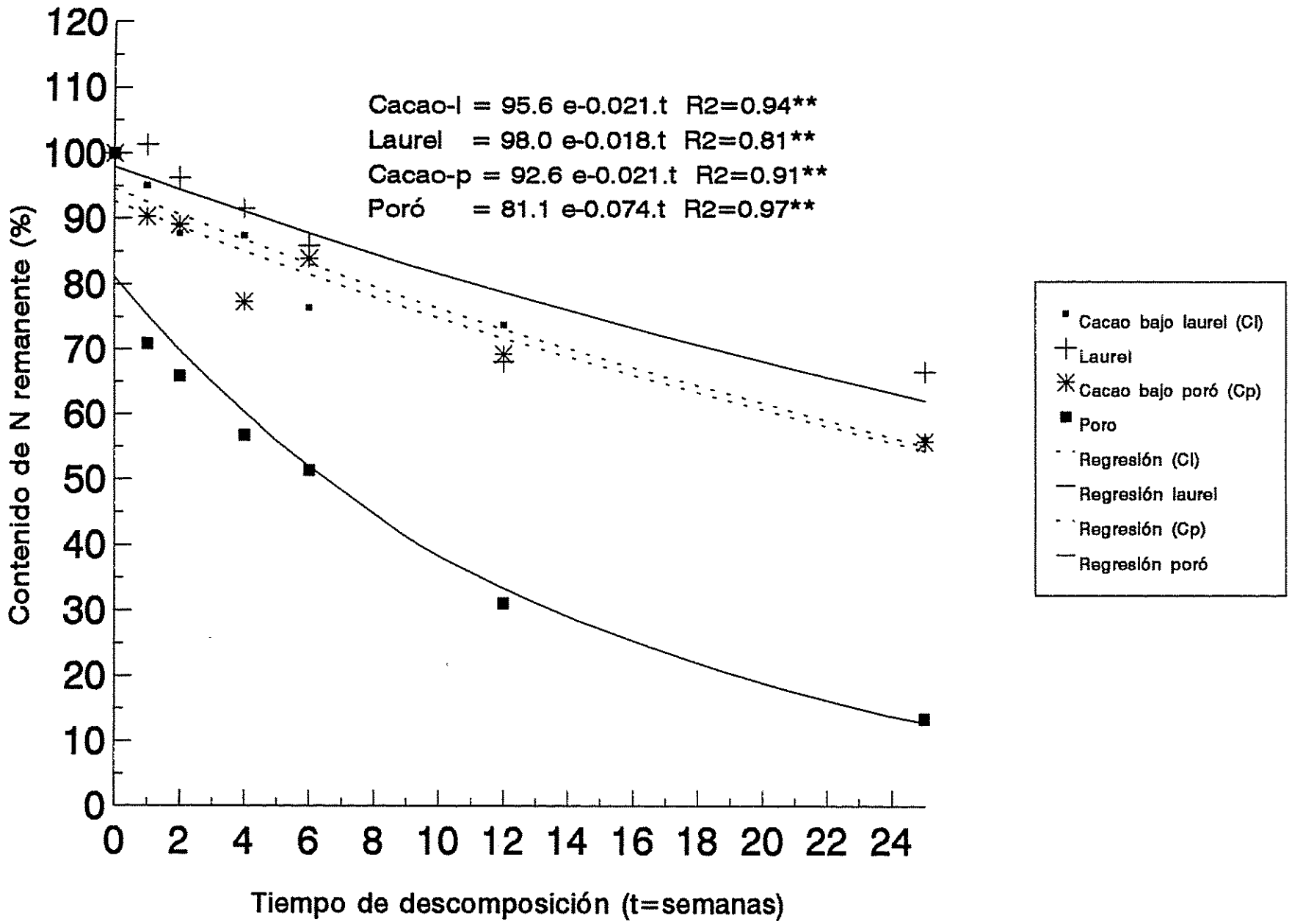


Figura 13. Liberación de N a partir de la descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época húmeda en Turrialba, Costa Rica.

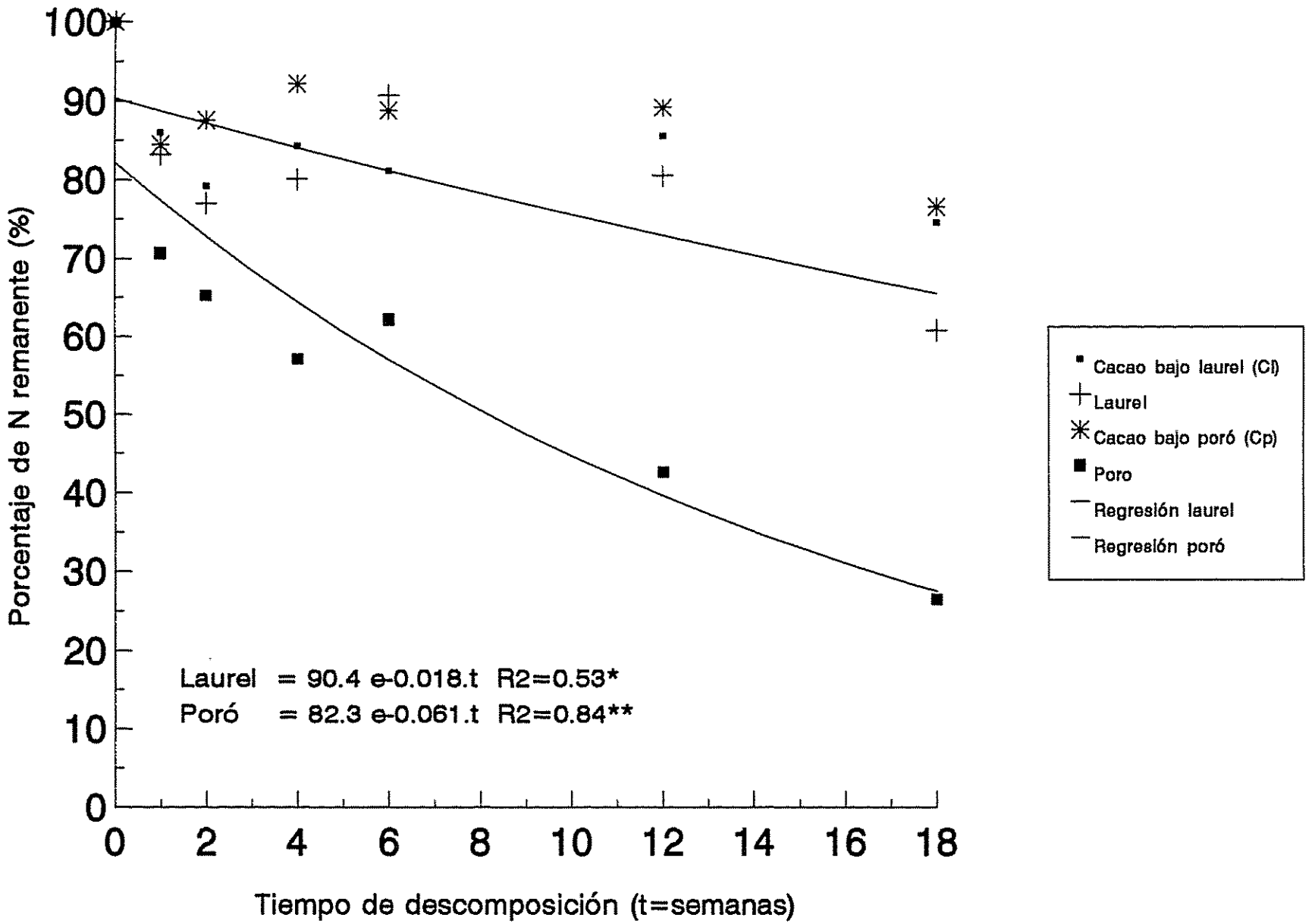


Figura 14. Liberación de N a partir de la descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la epoca seca en Turrialba, Costa Rica.

estas raíces sería liberado antes de la poda siguiente (26 semanas). Este proceso puede aumentar la disponibilidad de N en el sistema cacao/poró comparado con el sistema cacao/laurel, después de la poda de junio-julio a partir de las raíces y la hojarasca del poró en descomposición. Aunque esto no quiere decir que en el sistema cacao/poró haya disponibilidad inmediata de N pues este puede ser inmovilizado temporalmente por microorganismos (Brady, 1974).

En un estudio anterior (Imbach et al, 1989), las pérdidas de N por lixiviación estimadas en los dos sistemas fueron similares (5 kg ha^{-1} a^{-1}) y menores que las entradas de N en la precipitación (27 kg ha^{-1} a^{-1}). La extracción de N por cosecha de cacao fue estimada en 19 y 26 kg ha^{-1} a^{-1} en los sistemas con laurel y poró respectivamente (Heuveldop *et al*, 1988). La entrada de N a los dos sistemas por fertilización es de 120 kg ha^{-1} a^{-1}. Si se realiza un balance entre salidas y entradas de N a los sistemas, sin tener en cuenta posibles pérdidas por volatilización y escorrentía, se tienen entradas netas de 123 y 116 kg ha^{-1} a^{-1} de N en los sistemas con laurel y poró, respectivamente. Por lo tanto con respecto a N total, ambos sistemas parecen estables.

5.3.3 Liberación de Fósforo

En la época húmeda, el ajuste del patrón de liberación de P al modelo exponencial fue significativo pero bajo para todas las especies, excepto para el cacao bajo laurel (Anexo 2A). En los valores observados (Fig. 15) se nota que durante la primera semana de descomposición todas las especies liberaron aproximadamente el 50 % del P, excepto el laurel que liberó el 17 %. Entre la 1ª y la 25ª semana, las raíces de cacao y laurel perdieron menos del 15 % del P inicial y el poró perdió 25 % del contenido inicial. La liberación total de P durante 25 semanas fue aproximadamente de 77 % en poró, 70 % en cacao y 40 % en laurel.

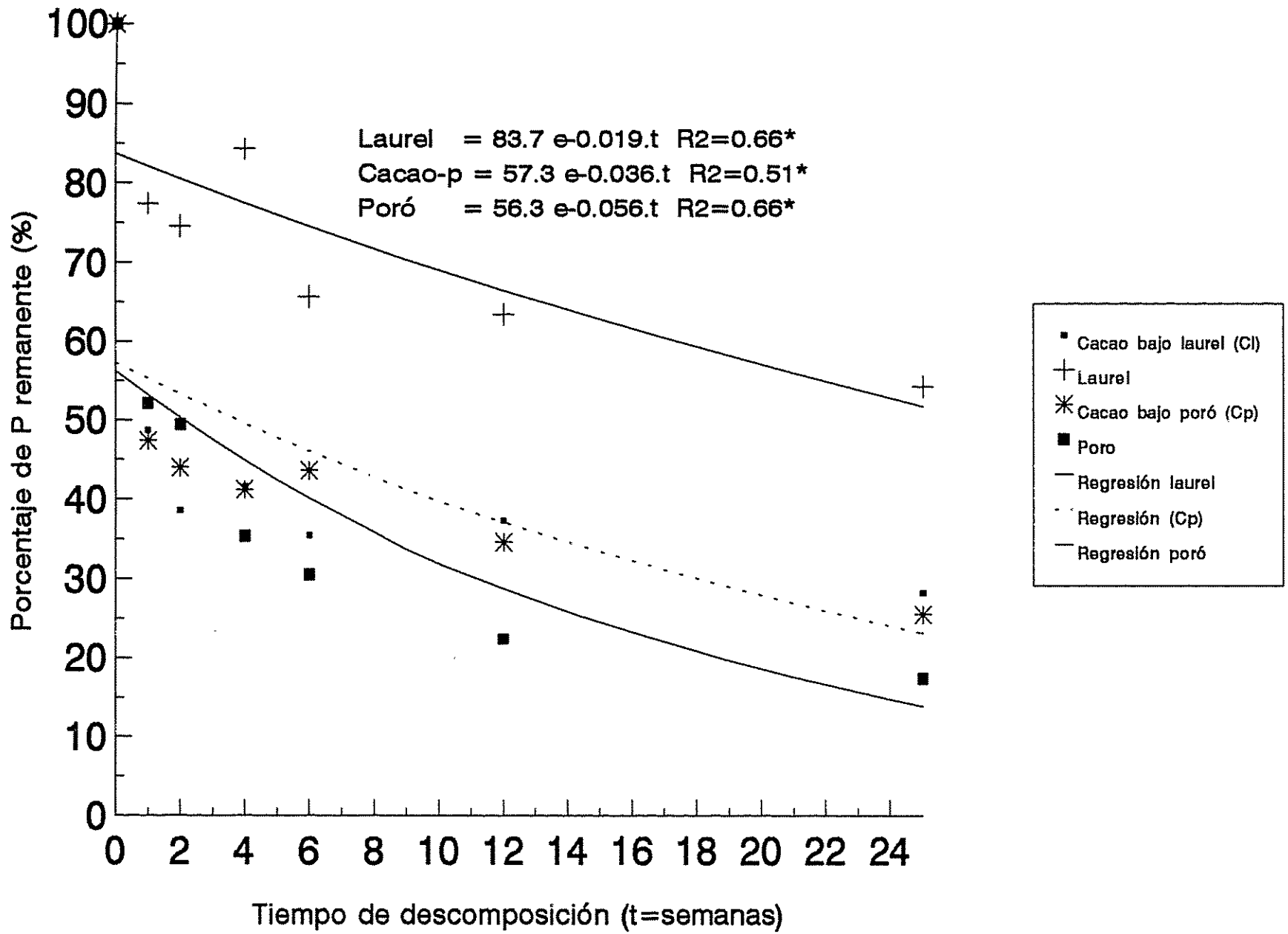


Figura 15. Liberación de P a partir de la descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época húmeda en Turrialba, Costa Rica.

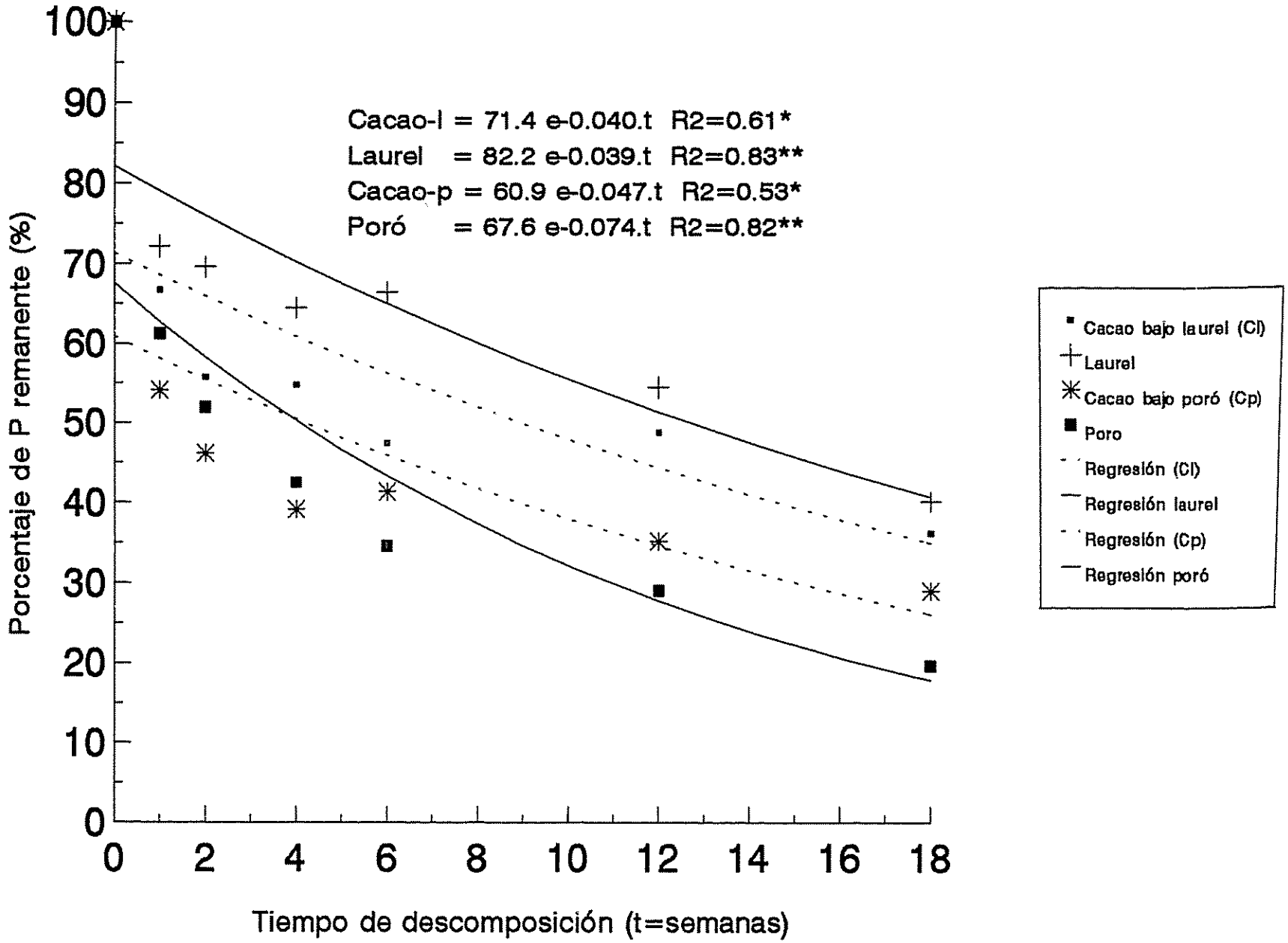


Figura 16. Liberación de P a partir de la descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época seca en Turrialba, Costa Rica.

En la época seca, el modelo exponencial fue altamente significativo para laurel y poró y significativo para el cacao en los dos sistemas (Fig. 16). En esta época, los patrones de liberación de las especies fueron similares a los de la época húmeda. Las diferencias se dieron principalmente por la cantidad liberada (27-45 % de la inicial) en la primera semana (Fig. 16). Durante las 18 semanas, el poró perdió aproximadamente 75 %, el cacao 57-65 %, y el laurel 55 % del P inicial.

Hasta la semana 18 de las dos épocas, se observó que la liberación de P de las raíces finas del laurel fue mayor en la época seca que en la húmeda (55 y 35 %, respectivamente). La liberación de P de las raíces finas del cacao fue semejante en las épocas seca y húmeda (aproximadamente 65 %); mientras para poró fue de aproximadamente 80 % en las dos épocas. El comportamiento de las raíces de laurel puede ser debido a que la altas fluctuaciones de humedad en el suelo durante la época seca (Fig. 7), favorecieron la mineralización del P (Fassbender y Bornemisza, 1987) de las raíces en descomposición. Este flujo de P inorgánico contribuir a aumentar la población de organismos descomponedores y por lo tanto la demanda de P. La concentración inicial de las raíces de laurel en las dos épocas fueron similares (Anexo 2A).

En un estudio anterior con la hojarasca de las mismas especies (Vilas Boas, 1990) se reportó que a los 60 días se observó acumulación de P en cacao y una tasa de liberación del 69 y 56 % del contenido inicial en laurel y poró, respectivamente. Las pérdidas estimadas por lixiviación en ambos sistemas (Imbach, 1989) fueron muy similares (0.46 kg ha^{-1} a^{-1}).

Hasta la primera semana de descomposición en las dos épocas se observó mayor liberación de P que de N (Figs. 13-16) en las dos épocas y para todas las especies.

5.3.4 Liberación de Potasio

El modelo exponencial no fue significativo para ninguna de las especies en ninguna de las dos épocas. Durante la primera semana de las 2 épocas se liberó entre el 82-92 % del contenido inicial de K (Cuadros 9 y 10). Despues de la segunda semana el contenido de K fue casi constante.

Cuadro. 9 Porcentaje de K remanente por especie en la época húmeda (Valores observados).

	K (% remanente)			
Semana	Cac-l‡	Laurel	Cac-p‡	Poró
0	100.00	100.00	100.00	100.00
1	13.22	8.75	10.28	7.56
2	7.41	5.48	8.81	4.98
4	7.82	5.58	8.02	2.88
6	6.99	4.69	7.76	2.32
12	6.48	3.94	5.23	1.37
25	4.98	3.24	4.23	0.77

‡Cac-l, Cac-p = cacao bajo laurel o poró respectivamente.

Comparando los resultados de las dos épocas, se puede deducir que la liberación de K, a partir de la descomposición de las raíces, parece no presentar variación significativa por efecto de la humedad del suelo o especie. El K no es parte integral de la estructura celular (Brady, 1974) y se encuentra formando sales o en forma iónica en el citoplasma celular de los tejidos vegetales (Fassbender y Bornemisza, 1987). Por esta razón posiblemente al presentarse rompimiento de las paredes celulares por la descomposición, el K es lavado fácilmente y pasa a la solución del suelo.

La liberación de K a partir de la hojarasca, en las mismas parcelas (Vilas Boas, 1990), fue un poco más lenta que en las raíces ya que a los 10 días aún quedaba en el cacao

bajo poró el 75 % del contenido inicial; en el cacao bajo laurel el 58 %; en el laurel el 60 %; y en poró el 72 % . Antes de la caida de las hojas el K es translocalizado y el K remanente en la hojarasca posiblemente es menos móvil que el K en las raíces utilizadas (cortadas) para este estudio.

Cuadro 10. Porcentaje de K remanente por especie en la época seca (Valores observados).

	K (% remanente)			
Semana	Cac-l‡	Laurel	Cac-p‡	Poró
0	100.00	100.00	100.00	100.00
1	18.27	9.14	14.34	9.29
2	15.03	7.40	12.74	7.74
4	13.12	5.82	11.17	5.14
6	13.79	5.84	9.93	3.29
12	12.34	4.46	9.57	2.93
18	11.96	3.36	8.33	1.64

‡Cac-l, Cac-p = cacao bajo laurel o poró respectivamente.

La liberación rápida del K no parece constituir un problema bajo ninguno de los sistemas. Se calculó una pérdida por lixiviación de aproximadamente 1.3 kg ha^{-1} a^{-1} de este elemento en ambos sistemas, cantidad que es insignificante al compararla con la entrada por fertilización, con las reservas totales del suelo y con el K que entra al sistema en la precipitación (Imbach *et al*, 1989).

5.3.5 Liberación de Calcio

Con excepción de poró, hubo una acumulación de Ca en las primeras cuatro semanas y liberación neta solamente despues de la semana 12 en la época lluviosa y ninguna liberación en la época seca (Figs. 17 y 18). Esta acumulación inicial de Ca concuerda con observaciones de un enriquecimiento del material en descomposición en bosques debido a concentración e inmovilización de nutrimentos realizada por la comunidad descomponedora (Anderson y Swift, 1983). Posiblemente hay

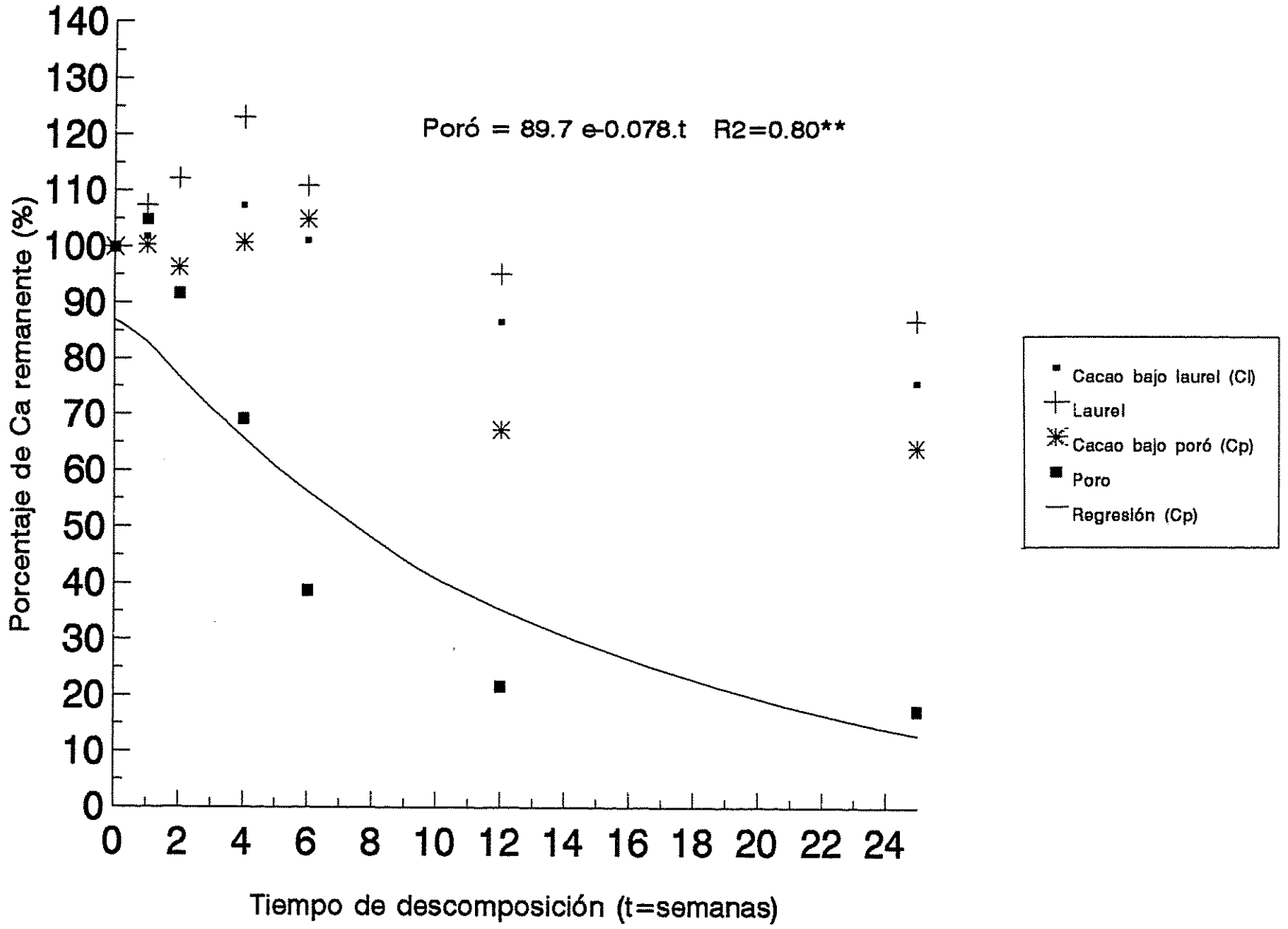


Figura 17. Liberación de Ca a partir de la descomposición de raíces finas de poró. laurel y cacao durante la época húmeda en Turrialba, Costa Rica.

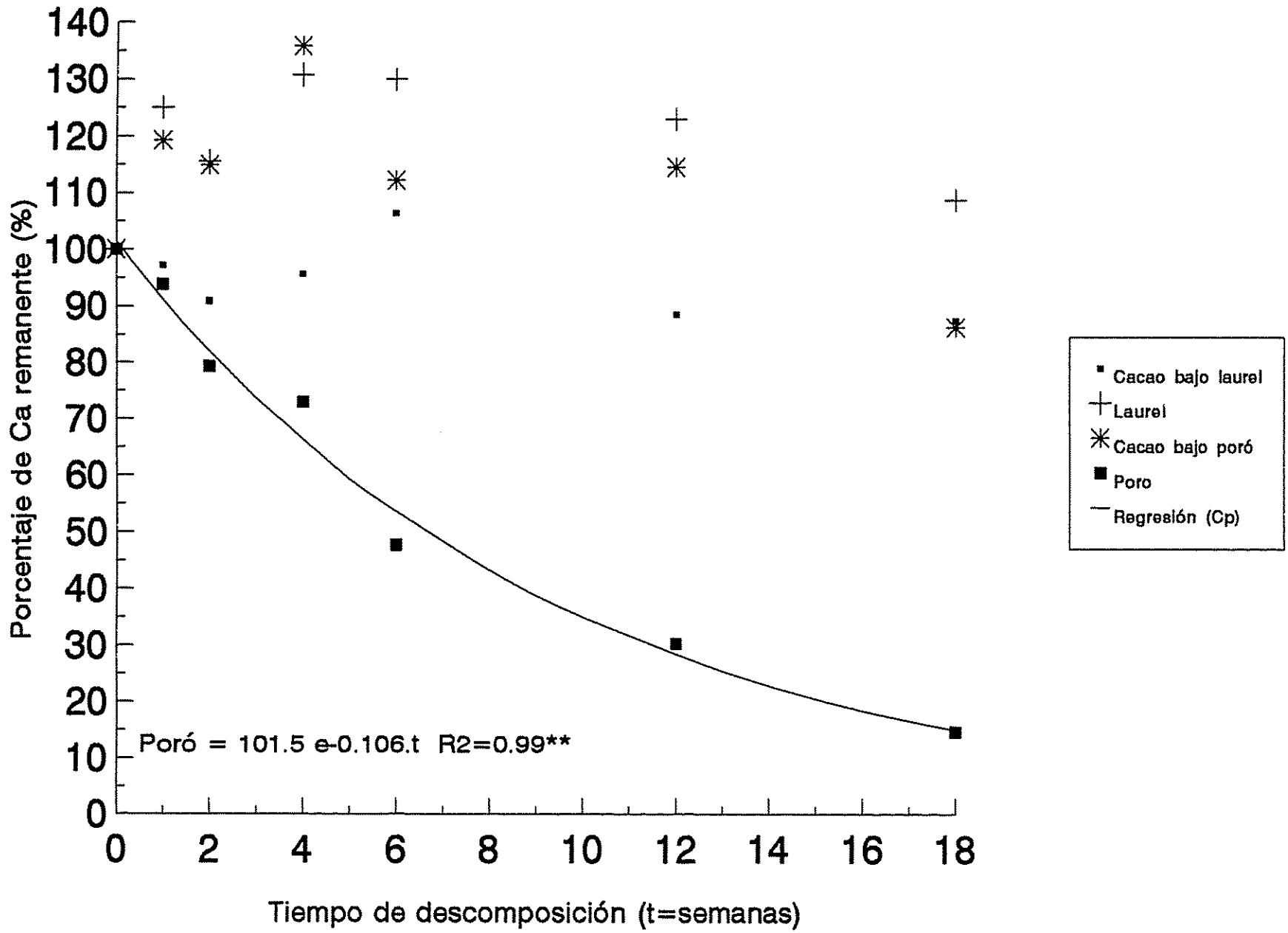


Figura 18. Liberación de Ca a partir de la descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época seca en Turrialba, Costa Rica.

translocalización de Ca hacia las raíces en descomposición por hongos.

En poró, la liberación de Ca se ajustó al modelo exponencial. Hubo poca inmovilización y durante 18 semanas hubo una pérdida de aproximadamente 80 % en ambas épocas. Por la relativamente rápida tasa de descomposición de las raíces de poró, posiblemente no hubo una efectiva colonización de los organismos descomponedores. Además, el Ca al hacer parte de la pared celular puede perderse facilmente de las raíces de poró ya que estas se descomponen con relativa facilidad.

Hubo una tendencia a la estabilidad del contenido de Ca en la hojarasca de todas las especies en estas parcelas, exceptuando al poró (Vilas Boas, 1990). El Ca, por ser un elemento que no presenta el fenómeno de fijación, es susceptible a pérdidas por erosión y lixiviación (Brady, 1974). Por lo tanto, la tendencia a acumular Ca, que presentan las raíces finas de cacao y laurel pueden hacer al sistema cacao/laurel más eficiente en el uso del Ca ya que este se libera lentamente, lo cual puede ayudar a evitar excesivas pérdidas por lixiviación. Esta hipótesis es apoyada por los datos de lixiviación en el mismo sitio de 27 y 7 kg ha^{-1} a^{-1} en los sistemas cacao/poró y cacao/laurel, respectivamente (Imbach *et al*, 1989).

5.3.6 Liberación de Magnesio

La liberación de Mg en la época húmeda fue descrita por un modelo exponencial semejante para todas las especies, excepto el poró (Fig. 19). En todas las especies la mayoría de liberación del Mg ocurrió durante 6 semanas con pocos cambios despues. La liberación de Mg de las raíces del cacao y el laurel fue de 65-75 %. En poró se observó una liberación de 85 % del contenido inicial de Mg.

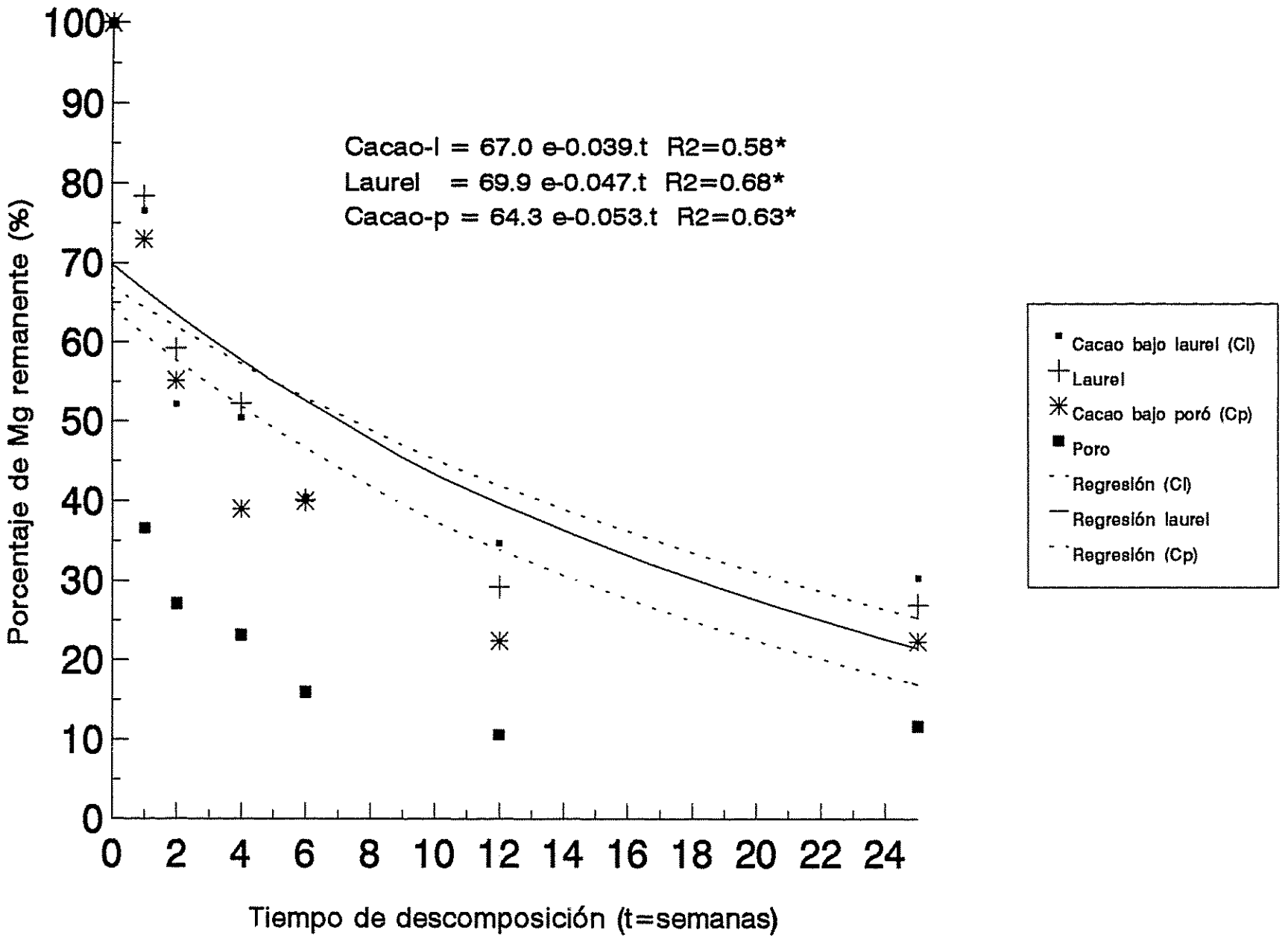


Figura 19. Liberación de Mg a partir de la descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época húmeda en Turrialba, Costa Rica.

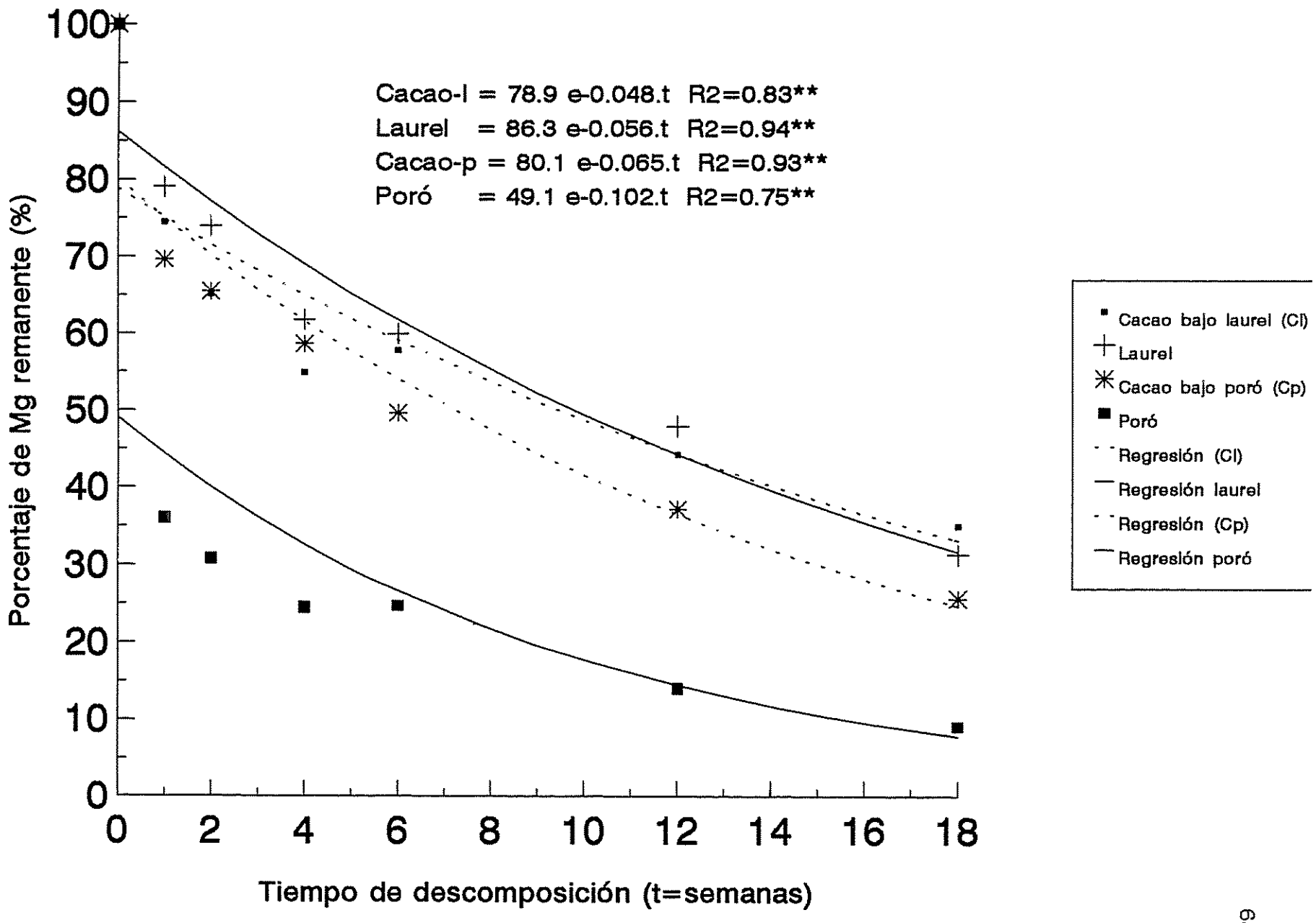


Figura 20. Liberación de Mg a partir de la descomposición de raíces finas de poró, laurel y cacao durante la época seca en Turrialba, Costa Rica.

En la época seca el modelo exponencial explicó la liberación de Mg de todas las especies (Fig. 20). De nuevo se observó una liberación alta durante la primeras seis semanas y pocos cambios despues. Hubo una gran diferencia en la liberación del Mg del cacao y el laurel durante la primera semana. El sistema cacao/poró liberó más Mg a partir de la descomposición de raíces que el sistema cacao/laurel.

Después de 18 semanas en la épocas húmeda y seca se observaron porcentajes de liberación de Mg de 60-70 % para cacao, 65 % para laurel y 85 % para poró. La igualdad de los porcentajes de liberación de Mg en las dos épocas sugieren que al igual que sucede con el K, la liberación de Mg no es afectada por la humedad del suelo.

La rápida liberación de Mg en el sistema cacao/poró es evidente y es confirmada por la pérdida de este elemento por lixiviación de 20 y 6 kg ha^{-1} a^{-1} de Mg en los sistemas cacao/poró y cacao/laurel, respectivamente (Imbach *et al*, 1989). Estos autores estimaron que si se dejara de aplicar fertilizante al sistema cacao/poró, las reservas de Mg del suelo se agotarían en 30 años.

El Ca no presenta el fenómeno de fijación lo que lo hace susceptible a pérdidas por lixiviación y escorrentía. Pero el Ca a diferencia del Mg es acumulado por los organismos descomponedores que se hayan en el suelo y hace parte de la pared celular. De ahí su patrón de acumulación en las raíces de laurel y cacao, especialmente en la época seca (Figs. 17 y 18). El patrón de liberación del Mg fue semejante al de K, especialmente a partir de las raíces del poró. El K y el Mg presentan el fenómeno de fijación en algunos suelos lo que los haría menos disponibles pero también menos susceptibles a pérdidas por lixiviación.

5.4 CONCLUSIONES GENERALES

La pérdida de peso y liberación de nutrimentos fue: poró > cacao bajo poró > cacao bajo laurel > laurel.

Usualmente hubo mayor descomposición de raíces finas en la época húmeda que en la seca.

La liberación de nutrimentos varió en el orden siguiente: K > Mg > P > N ≥ Ca . Despues de 18 semanas, se liberó aproximadamente 90 % del K, pero hubo poca liberación y hasta inmovilización de Ca.

Comparado con datos de hojarasca de las mismas especies, las raíces finas se descompusieron y liberaron nutrimentos más rápidamente que la hojarasca.

El poró puede ser recomendado como especie de sombra para cacao en condiciones donde se requiera rápida disponibilidad de nutrimentos. Aunque se debe tener el cuidado de que esa rápida liberación de nutrimentos este ligada a una rápida mineralización y absorción para evitar posibles pérdidas por lixiviación. Bajo las condiciones del sitio de estudio la asociación de laurel como árbol de sombra para el cacao demostró ventaja sobre la asociación con poró en la conservación de Ca y Mg.

La liberación rápida del Mg de las raíces y la hojarasca, seguida de pérdidas por lixiviación podría constituirse en un problema de deficiencia a largo plazo en el sistema cacao/poró.

Los nutrimentos liberados a partir de la descomposición de raíces están más protegidos de las pérdidas por escorrentia y volatilización a las que esta expuesta la hojarasca. A pesar de que la biomasa de raíces finas

renovadas anualmente (Capítulo 4) es menor que la de la hojarasca, posiblemente los nutrimentos que liberan son aprovechados en un porcentaje mayor que los nutrimentos liberados desde la hojarasca. Además son liberados en la rizósfera lo cual debe facilitar su rápida reabsorción.

6 BIBLIOGRAFIA

ALPIZAR, L.; FASSBENDER, H.W.; HEUVELDOP, J.; FOLSTER, H.; ENRIQUEZ, G. 1986. Modeling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with laurel (Cordia alliodora) and poró (Erythrina poeppigiana) in Costa Rica. I. Inventory of organic matter and nutrients. Agroforestry Systems (Holanda) 4:175-189.

ALVIN, P.T.; DANTAS, A.; VELLO, F. 1974. Physiological responses of cacao to environmental factors. Theobroma (Brasil) 4(4):3-25.

ANDERSON, J.M.; SWIFT, M.J. 1983. Decomposition in tropical forest. En: Tropical Rain Forest: ecology and management. Ed. S.L. Sutton, T.C. Whitmore, A.C. Chadwic. Oxford, Blackwell. pp. 287-309

BEER, J. 1988. Litter production and nutrient cycling in coffe (Coffea arabica) or cacao (Theobroma cacao) plantations with shade trees. Agroforestry Systems (Holanda) 7:103-114.

BEER, J.; BONNEMANN, W.; CHAVEZ, W.; FASSBENDER, H.W.; IMBACH, A.C.; MARTEL, I. 1990. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with laurel (Cordia alliodora) or poró (Erythrina poeppigiana) in Costa Rica. V. Productivity indices, organic material models and sustainability over ten years. Agroforestry Systems (Holanda) 12:229-249.

BEER, J.; IMBACH, A.; FASSBENDER, H.A. 1993. Producción de residuos vegetales de sistemas agroforestales de cacao (Theobroma cacao) con laurel (Cordia alliodora) o poró (Erythrina poeppigiana) en Costa Rica, (En preparación).

BENITES, J.R. 1990. Agroforestry systems with potential for acid soils of the humid tropics of Latin America and the caribbean. Forest Ecology and Management. (Holanda) 36:81-101.

BERISH, C.W. 1982. Root biomass and surface area in three successional tropical forests. Canadian Journal of Forest Research. (Canada) 12(3):699-704.

BERISH, C.W.; EWEL, J.J. 1988. Root development in simple and complex tropical successional ecosystems. Plant and Soil. (Holanda) 106:73-84.

BÖHM, W. 1979. Methods of studying root Systems. Berlin, Springer-Verlag. 188 p. (Ecological Studies. Analisis and synthesis, Vol 33).

BORCHERT, R. 1979. Simulation of rhythmic tree growth under constant conditions. Physiology Plant. 29:173-180.

BRADY, N.C. 1974. The nature and properties of soils. 8ª Ed. New York, U.S.A. McMillan. 639 p.

CADIMA, A. 1970. Estudo do sistema radicular do cacaueiro em alguns tipos de solos da regiao do sul da Bahia. Ed. por Luis Carlos Cruz. CEPLAC Boletin Técnico Nº5. Itabuna, Brasil. 31 p.

CAVELIER, J. 1989. Root biomass, production and the effect of fertilization in two tropical rain forests. Thesis Ph.D. University of Cambridge. Trinity College. Cambridge, England. 116 p.

DAHLMAN, R.C.; KUCERA, C.L. 1965. Root productivity and turnover in native prairie. Ecology (EE.UU) 46(1):84-89.

DIAS-ROMEU, R.; HUNTER, A. 1982. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigaciones en invernadero. CATIE. Serie de materiales de enseñanza nº 12. 61 p. (Mimeografiado).

DIJKMAN, M.J. 1950. Leucaena- A promising soil-erosion control plant. Economic Botany (EE.UU.) 4(4):337-349.

FABIAO, A.; PERSSON, H. A.; STEEN, E. 1985. Growth dynamics of superficial roots in Portuguese plantations of Eucalyptus globulus Labill. studied with a mesh bag technique. Plant and Soil (Holanda) 83:233-242.

FAIRLEY, R.I.; ALEXANDER, I.J. 1985. Methods of calculating fine root production in forests. En: Soil: Plants microbes and animals. Oxford, England. Blackwell. p. 37-42.

FASSBENDER, H.W. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. Centro Agronónico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 2ª Ed. (Serie de materiales de enseñanza Nº 29) 491 p.

FASSBENDER, H.W.; ALPIZAR, L.; HEUVELDOP, J.; FOLSTER, H.; ENRIQUEZ, G. 1988. Modeling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with laurel (Cordia alliodora) and poró (Erythrina poeppigiana) in Costa Rica. III. Cycles of organic matter and nutrients. Agroforestry Systems (Holanda) 6:37-48.

FASSBENDER, H.W.; BEER, J. 1993. Evaluación a los 15 años de la productividad, sostenibilidad e impacto ambiental de sistemas agroforestales de cacao con árboles de sombra en CATIE, Costa Rica. Presentado en reunión "40 años de agroforestería en CATIE" CATIE, Turrialba, Costa Rica. Agosto de 1993.

FASSBENDER, H.W.; BORNEMISZA, E. 1987. Química de suelos: con énfasis en suelos de América Latina. 2ª Ed. San José, Costa Rica, IICA. 420 p.

FOGEL, R. 1983. Root turnover and productivity of coniferous forest. Plant and Soil (Holanda) 71:75-85.

FOGEL, R. 1985. Roots as primary producers in below-ground ecosystems. En: Soil, Plants, Microbes and animals. Oxford, England. p 23-36.

FORD, E.D.; DEANS, J.D. 1977. Growth of a Sitka spruce plantation: Spatial distribution and seasonal fluctuations of lengths, weights and carbohydrate concentrations of fine roots. Plant and Soil. (Holanda) 47:463-485.

GOMEZ K.A; GOMEZ, A.A. 1984. Statistical procedures for agricultural research. IRRI. Los Baños, Filipinas. 450 p.

GREATHOUSE, D.C.; LAETCHS, W.M.; PHINNEY, B.O. 1971. The shoot-growth rhythm of a tropical tree, Theobroma cacao. American Journal of Botany. (EE.UU.) 58(4):281-286.

GREAVES, A. McCARTER, 1990. Cordia alliodora: A promising tree for tropical agroforestry. Oxford Forestry Institute, Oxford, U.K. 37 p. (Tropical Forestry Papers Nº 22)

GREENWOOD, M.; POSNETTE, A.F. 1950. The growth flushes of cacao. Journal of Horticultural Science. (G.B.) 25:164-174.

HAGGAR, J. 1990. Nitrogen and Phosphorus dynamics of systems integrating trees and annual crops in the tropics. Ph.D Thesis. University of Cambridge. 162 p.

HAGGAR, J.P.; TANNER, E.V.J.; BEER, J.W.; KASS, D.C.L. 1993. Nitrogen dynamics of tropical agroforestry and annual cropping systems. Soil Biol. Biochem. (G.B.) (En prensa).

HANSSON, A.C.; ANDREN, O. 1986. Below-ground plant production in a perennial grass ley (Festuca pratensis Huds.) assessed with different methods. Journal of Applied Ecology. (G.B.) 23:657-666.

HARDWICK, K; SLEIGH, P.A.; COLLIN, H.A. 1982. Interaction between root and shoot growth in cacao seedlings. 8th International Cocoa Research Conference. Proceedings. p.209-214.

HEUVELDOP, J.; FASSBENDER, H.W.; ALPIZAR, L.; ENRIQUEZ, G.; FOLSTER, H. 1988. Modeling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with laurel (Cordia alliodora) and poró (Erythrina poeppigiana) in Costa Rica. II. Cacao and wood production, litter production and decomposition. Agroforestry Systems (Holanda) 6:37-48.

HUXLEY, P.A.; TURK, A. 1974. Preliminary investigations with coffee in a root observation laboratory in Kenya. E.A. Agr. For. J. (Kenya) 40(3)300-312.

IMBACH, A.C.; FASSBENDER, H.W.; BOREL, R.; BEER, J.; BONNEMANN, A. 1989. Modeling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with laurel (Cordia alliodora) and poró (Erythrina poeppigiana) in Costa Rica. IV. Water balances, nutrient inputs and leaching. Agroforestry Systems (Holanda) 6:37-48.

JOHNSON Y MORALES 1972. A review of Cordia alliodora (Ruiz y Pavón) Oken. Turrialba (C.R.) 22:210-220.

KASS, D.; BARRANTES, A.; BERMUDEZ, W.; CAMPOS, W.; JIMENEZ, M.; y SANCHEZ, J. 1989. Resultados de seis años de investigación de cultivos en callejones (Alley cropping) en "La Montaña", Turrialba, Costa Rica. El Chasqui. (C.R.) 19:5-24.

KUMMEROW, J.; KUMMEROW, A.; ALVIM, P.T. 1981. Root biomass in a mature cacao (Theobroma cacao L.) plantation. Theobroma (Brasil) 11(1):77-85.

KUMMEROW, J.; KUMMEROW, M.; SOUZA, W. 1982. Fine-root growth dynamics in cacao (T. cacao). Plant and Soil. (Holanda) 65:193-201.

McCREARY, C.W.R.; McDONALD, J.A.; MULLOON, V.I.; HARDY, F. 1943 The root system of cacao. Tropical Agriculture (G.B.) 20(2):207-220.

McCLAUGHERTY; ABER, J.D.; MELILLO, J.M. 1982. The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. Ecology (EE:UU:) 63(5)1481-1490.

MOIR, W.H.; BACHELARD, E.P. 1969. Distribution of fine roots in the three Pinus radiata plantations near Camberra, Australia. Ecology (EE.UU.) 50(4):658-662.

MORA, A.; MORERA, J.; LAINEZ, J. 1992. Evaluación del cruce interclonal de cacao ´Catongo x Pound 12´ en CATIE, Costa Rica. II. Fenología. (En prensa)

MORERA, J.; MORA, A.; LAINES, J. 1993. Evaluación del cruce interclonal de cacao 'Catongo x Pound 12' en CATIE, Costa Rica. III. Rendimiento (En prensa)

NAMBIAR, E.K.S. 1987. Do nutrients retranslocate from fine roots? Canadian J. For. Res. (Canada) 17:913-918.

NOORDWIJK, M. van. 1992. Roots: lenght, biomass, production and mortality. En: TSBF Methods handbook. Appendix D. Ed. J.M. Anderson y J.S.I. Ingram. pp. 127-138.

PEREZ, FIGUEROA 1954. Estudio forestal del laurel *Cordia alliodora* (R & P) Cham., en Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. IICA. 182 p.

PERSSON, H. 1978. Root dynamics in a young Scots pine stand in Central Sweden. Oikos. 30:509-519.

PERSSON, H. 1979. Fine-root production, mortality and decomposition in forest ecosystems. Vegetatio (Holanda) 41(2):101-109.

PERSSON, H. 1983. The distribution and production of fine roots in boreal forest. Plant and Soil (Holanda) 71:87-101.

ROBERTS, J. 1976. A study of root distribution and growth in a Pinus silvestris L. (Scots pine) plantation in East Anglia. Plant and Soil. (Holanda) 44:607-621.

RUSSO, R. 1984. Studies on Erythrina poeppigiana (Walpers) O.F. Cook, a versatile tree in Costa Rican farms. Tesis Ph.D. Louisiana, EE.UU. Southeastern University. 145 p.

SALE, P.J.M. 1969. Extension growth of cacao under controlled temperature conditions. Journal of Horticultural Science. (G.B.) 44:189-193.

SALE, P.J.M. 1968. Flushing and leaf growth of cacao under controlled temperature conditions. Journal of Horticultural Science. (G.B.) 43:475-489.

SALE, P.J.M. 1970a. Growth, flowering and fruiting of cacao under controlled soil moisture conditions. Journal of Horticultural Science. (G.B.) 45:99-118.

SALE, P.J.M. 1970b. Growth and flowering of cacao under controlled atmospheric relative humidities. Journal of Horticultural Science. (G.B.) 45:119-132.

SANTANTONIO, D. 1990. Modeling growth and production of the tree roots. En: Growth and production of the tree roots. Timber press. Portland, Oregon. U.S.A. pp 113-123.

SANTANTONIO, D.; GRACE, J.C. 1987. Estimating fine root production and turnover from biomass and decomposition data: compartment-flow model. Canadian Journal of Forest Research. (Canada) 17(8):900-912.

SANTANTONIO, D.; SANTANTONIO, E. 1987. Effect of thinning on production and mortality of fine roots in a Pinus radiata plantation on a fertile site in New Zealand. Canadian Journal of Forest Research. (Canada) 17(8):919-928.

SCHLÖNVOIGT, M. 1993. Aufwuchsentwicklung von Cordia alliodora (Ruiz & Pavon) Oken in Abhangigkeit verschiedener Pflanzmethoden in agroforstlichen Systemen in der Atlantikzone von Costa Rica. Ph.D. tesis Göttingen. 162 p.

SLEIGH, P.A.; HARDWICK, K.; COLLIN, H.A. 1981. A study of of growth periodicity in cocoa seedlings, with particular emphasis on the root system. Café, Cacao, The. (Francia) 25(3):169-172.

SMYTH, S. 1991. Informe no publicado. Comunicacion personal.

STEEN, E. 1984. Variation of root Growth in a grass ley studied with a mesh bag technique. Swedish Journal of Agricultural Research. (Suecia) 14:93-97.

STEEN, E. 1985. Root and rhizome dynamics in a perennial grass crop during an annual growth cycle. Swedish Journal of Agricultural Research. (Suecia) 15:25-30.

TAYLOR, S.J.; HADLEY, P. 1987. Relation between root and shoot growth in cocoa (Theobroma cacao L.) grown under different shade regimes. 10th International Cocoa Research Conference. p.177-183.

TROPICAL SOIL BIOLOGY AND FERTILITY PROGRAMME. 1987. TSBF Methods Handbook. Draft. Ed. por J.M. Anderson y J.S.I. Ingram. 75 p.

VILAS BOAS, O. 1990. Descomposición de hojarasca y mineralización del nitrógeno de la materia orgánica del suelo bajo cuatro sistemas agroforestales, en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. CATIE. 152 p.

VITOUSEK, P.M.; SANFORD, R.L. Jr. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forest. Ann. Rev. Ecol. Syst. 17:137-67

VOGEL, M. 1975. Recherche du déterminisme du rythme de croissance du cacaoyer. Café, Cacao, The. (Francia) 19(4):265-290.

VOGT, K.A.; BLOOMFIELD, J. 1991. Tree root turnover and senescence. En Plant roots. The hidden half. Dekker. New York, U.S.A. 948 p.

ANEXO 1A

Concentraciones iniciales (%) de nutrimentos en los tejidos radiculares de cacao bajo laurel, laurel, cacao bajo poró y poró en la época húmeda.

Especie	N	P	K	Ca	Mg
cacao bajo laurel	1.50	0.19	0.76	0.50	0.38
laurel	1.62	0.10	1.14	0.81	0.71
cacao bajo poró	1.52	0.18	0.70	0.51	0.36
poró	2.68	0.23	1.74	0.76	0.41

Concentraciones iniciales (%) de nutrimentos en los tejidos radiculares de cacao bajo laurel, laurel, cacao bajo poró y poró en la época seca.

Especie	N	P	K	Ca	Mg
cacao bajo laurel	1.39	0.14	0.44	0.50	0.35
laurel	1.78	0.11	1.15	0.63	0.58
cacao bajo poró	1.37	0.17	0.50	0.47	0.31
poró	2.36	0.18	1.24	0.83	0.33

ANEXO 2A

ANALISIS DE VARIANZA DE BIOMASA TOTAL DE RAICES FINAS (BTRF)

Dependent Variable: BIOMASA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	59	0.97737607	0.01656570	2.09	0.0010
Error	84	0.66592746	0.00792771		
Corrected Total	143	1.64330353			

R-Square	C.V.	Root MSE	BIOMASA Mean
0.594763	42.24718	0.089038	0.21075412

Source	DF	SS	Mean Square	F Value	Pr > F
BLOQUE	1	0.01355979	0.01355979	0.84	0.5284
SISTEMA	1	0.12996295	0.12996295	8.02	0.2161
BLOQUE*SISTEMA	1	0.01621043	0.01621043	2.04	0.1564
AMBIENTE	5	0.02765921	0.00553184	0.30	0.9012
SISTEMA*AMBIENTE	5	0.09002707	0.01800541	0.98	0.4749
BLOQUE*SISTEM*AMBIEN	10	0.18364838	0.01836484	2.32	0.0185
FECHA	3	0.18320966	0.06106989	7.70	0.0001
SISTEMA*FECHA	3	0.06682790	0.02227597	2.81	0.0444
AMBIENTE*FECHA	15	0.07566235	0.00504416	0.64	0.8369
SISTEM*AMBIENT*FECHA	15	0.14605080	0.00973672	1.23	0.2677

ANALISIS DE VARIANZA DE LAS TASAS DE PRODUCCION DEL CACAO Y LOS ARBOLES DE SOMBRA

Dependent Variable: CACAO

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	59	0.00511809	0.00008675	1.54	0.0351
Error	84	0.00474303	0.00005646		
Corrected Total	143	0.00986113			

R-Square	C.V.	Root MSE	PCCAC Mean
0.519017	219.2218	0.007514	0.00342772

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
BLOQUE	1	0.00004414	0.00004414	0.11	0.7983
SISTEMA	1	0.00006422	0.00006422	0.16	0.7603
BLOQUE*SISTEMA	1	0.00041065	0.00041065	7.27	0.0085
AMBIENTE	5	0.00006860	0.00001372	0.36	0.8672
SISTEMA*AMBIENTE	5	0.00028116	0.00005623	1.46	0.2855
BLOQUE*SISTEM*AMBIEN	10	0.00038557	0.00003856	0.68	0.7375
FECHA	3	0.00204531	0.00068177	12.07	0.0001
SISTEMA*FECHA	3	0.00013677	0.00004559	0.81	0.4933
AMBIENTE*FECHA	15	0.00038305	0.00002554	0.45	0.9572
SISTEM*AMBIENT*FECHA	15	0.00053563	0.00003571	0.63	0.8402

Dependent Variable: ARBOLES DE SOMBRA

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	59	0.06793654	0.00115147	2.10	0.0009
Error	84	0.04610249	0.00054884		
Corrected Total	143	0.11403903			

R-Square	C.V.	Root MSE	ARBOLES DE SOMBRA Mean
0.595731	133.2372	0.023427	0.01758316

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
BLOQUE	1	0.00238541	0.00238541	10.12	0.1939
SISTEMA	1	0.00176821	0.00176821	7.50	0.2228
BLOQUE*SISTEMA	1	0.00023561	0.00023561	0.43	0.5141
AMBIENTE	5	0.00722058	0.00144412	2.16	0.1410
SISTEMA*AMBIENTE	5	0.00252738	0.00050548	0.75	0.6017
BLOQUE*SISTEM*AMBIEN	10	0.00669869	0.00066987	1.22	0.2900
FECHA	3	0.01858162	0.00619387	11.29	0.0001
SISTEMA*FECHA	3	0.00556451	0.00185484	3.38	0.0220
AMBIENTE*FECHA	15	0.00592123	0.00039475	0.72	0.7586
SISTEM*AMBIENT*FECHA	15	0.01628482	0.00108565	1.98	0.0264

Pérdida de peso en la epoca húmeda

Dependent Variable: Cacao bajo poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.16231	0.16231	22.610	0.0051
Error	5	0.03589	0.00718		
C Total	6	0.19820			

Root MSE	0.08473	R-square	0.8189
Dep Mean	4.38682	Adj R-sq	0.7827
C.V.	1.93137		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.519720	0.04250465	106.335	0.0001
SEMANA	1	-0.018606	0.00391287	-4.755	0.0051

Dependent Variable: Cacao bajo laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.11410	0.11410	35.413	0.0019
Error	5	0.01611	0.00322		
C Total	6	0.13021			

Root MSE	0.05676	R-square	0.8763
Dep Mean	4.42220	Adj R-sq	0.8515
C.V.	1.28356		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.533623	0.02847571	159.210	0.0001
SEMANA	1	-0.015600	0.00262140	-5.951	0.0019

Dependent Variable: Poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	2.15878	2.15878	179.605	0.0001
Error	5	0.06010	0.01202		
C Total	6	2.21888			

Root MSE	0.10963	R-square	0.9729
Dep Mean	3.93478	Adj R-sq	0.9675
C.V.	2.78628		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.419458	0.05500034	80.353	0.0001
SEMANA	1	-0.067855	0.00506319	-13.402	0.0001

Dependent Variable: Laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.17231	0.17231	41.214	0.0014
Error	5	0.02090	0.00418		
C Total	6	0.19322			

Root MSE	0.06466	R-square	0.8918
Dep Mean	4.38670	Adj R-sq	0.8702
C.V.	1.47401		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.523638	0.03243836	139.453	0.0001
SEMANA	1	-0.019171	0.00298619	-6.420	0.0014

Pérdida de peso en la epoca seca

Dependent Variable: Cacao bajo poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.03941	0.03941	39.336	0.0015
Error	5	0.00501	0.00100		
C Total	6	0.04442			

Root MSE	0.03165	R-square	0.8872
Dep Mean	4.48292	Adj R-sq	0.8647
C.V.	0.70604		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.558420	0.01697153	268.592	0.0001
SEMANA	1	-0.012291	0.00195970	-6.272	0.0015

Dependent Variable: Cacao bajo laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.04148	0.04148	62.165	0.0005
Error	5	0.00334	0.00067		
C Total	6	0.04481			

Root MSE	0.02583	R-square	0.9256
Dep Mean	4.48521	Adj R-sq	0.9107
C.V.	0.57591		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.562670	0.01385044	329.424	0.0001
SEMANA	1	-0.012610	0.00159931	-7.884	0.0005

Dependent Variable: Poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.91046	0.91046	135.720	0.0001
Error	5	0.03354	0.00671		
C Total	6	0.94400			

Root MSE	0.08190	R-square	0.9645
Dep Mean	4.10943	Adj R-sq	0.9574
C.V.	1.99309		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.472336	0.04391749	101.835	0.0001
SEMANA	1	-0.059078	0.00507116	-11.650	0.0001

Dependent Variable: Laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.17276	0.17276	139.725	0.0001
Error	5	0.00618	0.00124		
C Total	6	0.17894			

Root MSE	0.03516	R-square	0.9655
Dep Mean	4.40279	Adj R-sq	0.9585
C.V.	0.79866		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.560878	0.01885458	241.898	0.0001
SEMANA	1	-0.025735	0.00217714	-11.821	0.0001

Liberación de Nitrógeno en la época húmeda.

Dependent Variable: **Cacao bajo poró**

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.21313	0.21313	59.943	0.0006
Error	5	0.01778	0.00356		
C Total	6	0.23090			

Root MSE	0.05963	R-square	0.9230
Dep Mean	4.37643	Adj R-sq	0.9076
C.V.	1.36249		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.528719	0.02991386	151.392	0.0001
SEMANA	1	-0.021321	0.00275379	-7.742	0.0006

Dependent Variable: **Cacao bajo laurel**

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.21598	0.21598	88.239	0.0002
Error	5	0.01224	0.00245		
C Total	6	0.22822			

Root MSE	0.04947	R-square	0.9464
Dep Mean	4.39618	Adj R-sq	0.9356
C.V.	1.12539		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.549482	0.02481991	183.300	0.0001
SEMANA	1	-0.021463	0.00228486	-9.394	0.0002

Dependent Variable: **Poró**

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	2.56826	2.56826	204.377	0.0001
Error	5	0.06283	0.01257		
C Total	6	2.63109			

Root MSE	0.11210	R-square	0.9761
Dep Mean	3.86688	Adj R-sq	0.9713
C.V.	2.89896		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.395535	0.05623721	78.161	0.0001
SEMANA	1	-0.074012	0.00517705	-14.296	0.0001

Dependent Variable: **Laurel**

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.15616	0.15616	26.548	0.0036
Error	5	0.02941	0.00588		
C Total	6	0.18556			

Root MSE	0.07669	R-square	0.8415
Dep Mean	4.45449	Adj R-sq	0.8098
C.V.	1.72172		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.584843	0.03847516	119.164	0.0001
SEMANA	1	-0.018250	0.00354193	-5.153	0.0036

Liberación de nitrógeno en la época seca.

Dependent Variable: Cacao bajo poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.01914	0.01914	4.604	0.0847
Error	5	0.02079	0.00416		
C Total	6	0.03993			

Root MSE	0.06448	R-square	0.4794
Dep Mean	4.47912	Adj R-sq	0.3753
C.V.	1.43965		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.531740	0.03457626	131.065	0.0001
SEMANA	1	-0.008567	0.00399252	-2.146	0.0847

Dependent Variable: Cacao bajo laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.01948	0.01948	3.188	0.1343
Error	5	0.03055	0.00611		
C Total	6	0.05003			

Root MSE	0.07817	R-square	0.3893
Dep Mean	4.43235	Adj R-sq	0.2672
C.V.	1.76362		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.485437	0.04191485	107.013	0.0001
SEMANA	1	-0.008641	0.00483991	-1.785	0.1343

Dependent Variable: Poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.96840	0.96840	55.691	0.0007
Error	5	0.08694	0.01739		
C Total	6	1.05535			

Root MSE	0.13187	R-square	0.9176
Dep Mean	4.03562	Adj R-sq	0.9011
C.V.	3.26739		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.410103	0.07070705	62.371	0.0001
SEMANA	1	-0.060929	0.00816455	-7.463	0.0007

Dependent Variable: Laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.08345	0.08345	6.953	0.0462
Error	5	0.06002	0.01200		
C Total	6	0.14347			

Root MSE	0.10956	R-square	0.5817
Dep Mean	4.39419	Adj R-sq	0.4980
C.V.	2.49327		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.504065	0.05874589	76.670	0.0001
SEMANA	1	-0.017886	0.00678339	-2.637	0.0462

Liberación de Fósforo en la época húmeda

Dependent Variable: Cacao bajo poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.61902	0.61902	7.354	0.0422
Error	5	0.42090	0.08418		
C Total	6	1.03993			

Root MSE	0.29014	R-square	0.5953
Dep Mean	3.78940	Adj R-sq	0.5143
C.V.	7.65659		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.048944	0.14555503	27.817	0.0001
SEMANA	1	-0.036336	0.01339943	-2.712	0.0422

Dependent Variable: Cacao bajo laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.42562	0.42562	3.888	0.1057
Error	5	0.54728	0.10946		
C Total	6	0.97290			

Root MSE	0.33084	R-square	0.4375
Dep Mean	3.77240	Adj R-sq	0.3250
C.V.	8.77009		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	3.987608	0.16597484	24.025	0.0001
SEMANA	1	-0.030129	0.01527922	-1.972	0.1057

Dependent Variable: Poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	1.47632	1.47632	12.798	0.0159
Error	5	0.57677	0.11535		
C Total	6	2.05309			

Root MSE	0.33964	R-square	0.7191
Dep Mean	3.62943	Adj R-sq	0.6629
C.V.	9.35791		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.030244	0.17038762	23.653	0.0001
SEMANA	1	-0.056114	0.01568545	-3.577	0.0159

Dependent Variable: Laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.17457	0.17457	12.706	0.0161
Error	5	0.06870	0.01374		
C Total	6	0.24327			

Root MSE	0.11722	R-square	0.7176
Dep Mean	4.28975	Adj R-sq	0.6611
C.V.	2.73245		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.427583	0.05880370	75.294	0.0001
SEMANA	1	-0.019296	0.00541332	-3.565	0.0161

Liberación de Fósforo en la época seca

Dependent Variable: **Cacao bajo poró**

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.58055	0.58055	7.799	0.0383
Error	5	0.37217	0.07443		
C Total	6	0.95272			

Root MSE	0.27283	R-square	0.6094
Dep Mean	3.81990	Adj R-sq	0.5312
C.V.	7.14226		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.109696	0.14629087	28.093	0.0001
SEMANA	1	-0.047176	0.01689221	-2.793	0.0383

Dependent Variable: **Laurel**

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.40110	0.40110	30.433	0.0027
Error	5	0.06590	0.01318		
C Total	6	0.46700			

Root MSE	0.11480	R-square	0.8589
Dep Mean	4.16817	Adj R-sq	0.8307
C.V.	2.75429		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.409042	0.06155788	71.624	0.0001
SEMANA	1	-0.039213	0.00710809	-5.517	0.0027

Dependent Variable: **Poró**

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	1.43396	1.43396	27.845	0.0033
Error	5	0.25749	0.05150		
C Total	6	1.69144			

Root MSE	0.22693	R-square	0.8478
Dep Mean	3.75828	Adj R-sq	0.8173
C.V.	6.03815		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.213726	0.12168090	34.629	0.0001
SEMANA	1	-0.074142	0.01405050	-5.277	0.0033

Dependent Variable: **Cacao bajo laurel**

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.41107	0.41107	10.634	0.0224
Error	5	0.19329	0.03866		
C Total	6	0.60436			

Root MSE	0.19662	R-square	0.6802
Dep Mean	4.02388	Adj R-sq	0.6162
C.V.	4.88623		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.267729	0.10542606	40.481	0.0001
SEMANA	1	-0.039697	0.01217355	-3.261	0.0224

Liberación de Potasio en la época húmeda.

Dependent Variable: Cacao bajo poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	2.39026	2.39026	2.850	0.1522
Error	5	4.19395	0.83879		
C Total	6	6.58422			

Root MSE	0.91586	R-square	0.3630
Dep Mean	2.33410	Adj R-sq	0.2356
C.V.	39.23812		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	2.844101	0.45945981	6.190	0.0016
SEMANA	1	-0.071401	0.04229670	-1.688	0.1522

Dependent Variable: Cacao bajo laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	1.91670	1.91670	2.192	0.1988
Error	5	4.37272	0.87454		
C Total	6	6.28942			

Root MSE	0.93517	R-square	0.3048
Dep Mean	2.38075	Adj R-sq	0.1657
C.V.	39.28052		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	2.837446	0.46914964	6.048	0.0018
SEMANA	1	-0.063938	0.04318873	-1.480	0.1988

Dependent Variable: Poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	7.92651	7.92651	5.571	0.0647
Error	5	7.11446	1.42289		
C Total	6	15.04097			

Root MSE	1.19285	R-square	0.5270
Dep Mean	1.45548	Adj R-sq	0.4324
C.V.	81.95557		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	2.384221	0.59842065	3.984	0.0105
SEMANA	1	-0.130023	0.05508909	-2.360	0.0647

Dependent Variable: Laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	2.53536	2.53536	2.216	0.1967
Error	5	5.71994	1.14399		
C Total	6	8.25530			

Root MSE	1.06957	R-square	0.3071
Dep Mean	2.04075	Adj R-sq	0.1685
C.V.	52.41075		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	2.566009	0.53657630	4.782	0.0050
SEMANA	1	-0.073536	0.04939585	-1.489	0.1967

Liberación de Potasio en la época seca.

Dependent Variable: Cacao bajo poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	1.48236	1.48236	2.512	0.1736
Error	5	2.95054	0.59011		
C Total	6	4.43290			

Root MSE	0.76818	R-square	0.3344
Dep Mean	2.69992	Adj R-sq	0.2013
C.V.	28.45215		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	3.162987	0.41190283	7.679	0.0006
SEMANA	1	-0.075383	0.04756244	-1.585	0.1738

Dependent Variable: Cacao bajo laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	1.00703	1.00703	2.061	0.2106
Error	5	2.44260	0.48852		
C Total	6	3.44963			

Root MSE	0.69894	R-square	0.2919
Dep Mean	2.91605	Adj R-sq	0.1503
C.V.	23.96877		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	3.297727	0.37477507	8.799	0.0003
SEMANA	1	-0.062133	0.04327530	-1.436	0.2106

Dependent Variable: Poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	6.05304	6.05304	6.553	0.0507
Error	5	4.61870	0.92374		
C Total	6	10.67175			

Root MSE	0.96111	R-square	0.5672
Dep Mean	1.89693	Adj R-sq	0.4806
C.V.	50.66676		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	2.832674	0.51535242	5.497	0.0027
SEMANA	1	-0.152330	0.05950777	-2.560	0.0507

Dependent Variable: Laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	3.17231	3.17231	3.506	0.1200
Error	5	4.52371	0.90474		
C Total	6	7.69602			

Root MSE	0.95118	R-square	0.4122
Dep Mean	2.14437	Adj R-sq	0.2946
C.V.	44.35706		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	2.821788	0.51002518	5.533	0.0026
SEMANA	1	-0.110277	0.05889264	-1.873	0.1200

Liberación de Calcio en la época húmeda

Dependent Variable: Cacao bajo poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.20338	0.20338	17.161	0.0090
Error	5	0.05926	0.01185		
C Total	6	0.26263			

Root MSE	0.10886	R-square	0.7744
Dep Mean	4.48853	Adj R-sq	0.7293
C.V.	2.42536		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.637293	0.05461354	84.911	0.0001
SEMANA	1	-0.020827	0.00502758	-4.143	0.0090

Dependent Variable: Cacao bajo laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.06652	0.06652	16.380	0.0099
Error	5	0.02030	0.00406		
C Total	6	0.08682			

Root MSE	0.06372	R-square	0.7661
Dep Mean	4.54800	Adj R-sq	0.7194
C.V.	1.40114		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.633076	0.03196851	144.926	0.0001
SEMANA	1	-0.011911	0.00294294	-4.047	0.0099

Dependent Variable: Poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	2.81799	2.81799	24.822	0.0042
Error	5	0.56764	0.11353		
C Total	6	3.38563			

Root MSE	0.33694	R-square	0.8323
Dep Mean	3.94239	Adj R-sq	0.7988
C.V.	8.54656		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.496152	0.16903322	26.599	0.0001
SEMANA	1	-0.077526	0.01556077	-4.982	0.0042

Dependent Variable: Laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.04391	0.04391	5.994	0.0581
Error	5	0.03663	0.00733		
C Total	6	0.08054			

Root MSE	0.08559	R-square	0.5452
Dep Mean	4.64924	Adj R-sq	0.4542
C.V.	1.84095		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.718367	0.04293823	109.887	0.0001
SEMANA	1	-0.009677	0.00395278	-2.448	0.0581

Liberación de Calcio en la época seca.

Dependent Variable: Cacao bajo poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.03743	0.03743	2.184	0.1995
Error	5	0.08569	0.01714		
C Total	6	0.12312			

Root MSE	0.13091	R-square	0.3040
Dep Mean	4.70842	Adj R-sq	0.1648
C.V.	2.78044		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.782001	0.07019692	68.123	0.0001
SEMANA	1	-0.011978	0.00810564	-1.478	0.1995

Dependent Variable: Cacao bajo laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.01088	0.01088	2.838	0.1529
Error	5	0.01917	0.00383		
C Total	6	0.03006			

Root MSE	0.06193	R-square	0.3621
Dep Mean	4.55356	Adj R-sq	0.2345
C.V.	1.35994		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.593239	0.03320480	138.331	0.0001
SEMANA	1	-0.006459	0.00383416	-1.685	0.1529

Dependent Variable: Poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	2.95429	2.95429	492.121	0.0001
Error	5	0.03002	0.00600		
C Total	6	2.98431			

Root MSE	0.07748	R-square	0.9899
Dep Mean	3.96623	Adj R-sq	0.9879
C.V.	1.95350		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.619951	0.04154509	111.203	0.0001
SEMANA	1	-0.106420	0.00479721	-22.184	0.0001

Dependent Variable: Laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.00011	0.00011	0.009	0.9285
Error	5	0.05922	0.01184		
C Total	6	0.05933			

Root MSE	0.10883	R-square	0.0018
Dep Mean	4.77474	Adj R-sq	-0.1979
C.V.	2.27930		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.778649	0.05835539	81.889	0.0001
SEMANA	1	-0.000636	0.00673830	-0.094	0.9285

Liberación de Magnesio en la época húmeda

Dependent Variable: Cacao bajo poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	1.33947	1.33947	11.503	0.0194
Error	5	0.58225	0.11645		
C Total	6	1.92171			

Root MSE	0.34125	R-square	0.6970
Dep Mean	3.78156	Adj R-sq	0.6364
C.V.	9.02395		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.163348	0.17119419	24.319	0.0001
SEMANA	1	-0.053450	0.01575970	-3.392	0.0194

Dependent Variable: Cacao bajo laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.71414	0.71414	9.446	0.0277
Error	5	0.37802	0.07560		
C Total	6	1.09215			

Root MSE	0.27496	R-square	0.6539
Dep Mean	3.92540	Adj R-sq	0.5847
C.V.	7.00464		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.204170	0.13794022	30.478	0.0001
SEMANA	1	-0.039028	0.01269843	-3.073	0.0277

Dependent Variable: Poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	1.87697	1.87697	5.521	0.0656
Error	5	1.69981	0.33996		
C Total	6	3.57677			

Root MSE	0.58306	R-square	0.5248
Dep Mean	3.17740	Adj R-sq	0.4297
C.V.	18.35030		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	3.629337	0.29250655	12.408	0.0001
SEMANA	1	-0.063271	0.02692741	-2.350	0.0656

Dependent Variable: Laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	1.04710	1.04710	13.497	0.0144
Error	5	0.38789	0.07758		
C Total	6	1.43498			

Root MSE	0.27853	R-square	0.7297
Dep Mean	3.90884	Adj R-sq	0.6756
C.V.	7.12557		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.246393	0.13972943	30.390	0.0001
SEMANA	1	-0.047258	0.01286314	-3.674	0.0144

Liberación de Magnesio en la época seca.

Dependent Variable: Poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	2.70986	2.70986	18.610	0.0076
Error	5	0.72805	0.14561		
C Total	6	3.43791			

Root MSE	0.38159	R-square	0.7882
Dep Mean	3.26821	Adj R-sq	0.7459
C.V.	11.67574		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	3.894312	0.20460868	19.033	0.0001
SEMANA	1	-0.101923	0.02362618	-4.314	0.0076

Dependent Variable: Cacao bajo poró

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	1.11739	1.11739	78.082	0.0003
Error	5	0.07155	0.01431		
C Total	6	1.18895			

Root MSE	0.11963	R-square	0.9398
Dep Mean	3.98098	Adj R-sq	0.9278
C.V.	3.00496		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.383028	0.06414436	68.331	0.0001
SEMANA	1	-0.065449	0.00740675	-8.836	0.0003

Dependent Variable: Cacao bajo laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.60503	0.60503	31.029	0.0026
Error	5	0.09750	0.01950		
C Total	6	0.70253			

Root MSE	0.13964	R-square	0.8612
Dep Mean	4.07178	Adj R-sq	0.8335
C.V.	3.42944		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.367617	0.07487486	58.332	0.0001
SEMANA	1	-0.048160	0.00864580	-5.570	0.0026

Dependent Variable: Laurel

Analysis of Variance

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0.80728	0.80728	91.679	0.0002
Error	5	0.04403	0.00881		
C Total	6	0.85131			

Root MSE	0.09384	R-square	0.9483
Dep Mean	4.11581	Adj R-sq	0.9379
C.V.	2.27993		

Parameter Estimates

Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	T for H0: Parameter=0	Prob > |T|
INTERCEP	1	4.457543	0.05031608	88.591	0.0001
SEMANA	1	-0.055630	0.00581000	-9.575	0.0002