

Serie de Materiales de Enseñanza No. 29

MODELOS EDAFOLOGICOS DE SISTEMAS AGROFORESTALES

H.W. Fassbender

SEGUNDA EDICION

**CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION
Y ENSEÑANZA. CATIE**

**PROYECTO AGROFORESTAL CATIE/GTZ
Turrialba, Costa Rica. 1993**

El CATIE es una institución de carácter científico y educacional, cuyo propósito fundamental es la investigación y la enseñanza de posgrado en el campo de las ciencias agropecuarias y de los recursos naturales renovables aplicados al trópico americano, particularmente en los países de América Central y el Caribe.

La GTZ (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Sociedad Alemana de Cooperación Técnica) es responsable de planificar y realizar proyectos de cooperación técnica con los países en-vía de desarrollo. Sus funciones principales son: planificar, manejar y controlar proyectos y programas junto con las organizaciones nacionales; aconsejar a otras organizaciones que trabajen en el área de cooperación técnica; seleccionar y preparar técnicos para el trabajo en los diversos países; y ejecutar la planificación técnica, la compra y el envío de los materiales necesarios para el uso en los proyectos.

C 1992 Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE, Turrialba

ISBN 9977-57-021-3

631.58

F249 Fassbender, H.W.

Modelos edafológicos de los sistemas de producción agroforestales/H.W. Fassbender,-- 2a. ed=

Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Programa II, Producción y Desarrollo Agropecuario Sostenido, 1992.

530 p ; 21 cm. -- (Serie Materiales de Enseñanza/ Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza; no. 29)

ISBN 9977-57-021-3

1. Sistemas de producción agroforestales.
2. Edafología. I. CATIE. II. Sociedad Alemana de Cooperación Técnica. III. Título. IV. Serie.

PROLOGO A LA PRIMERA EDICION

Dentro de las actividades del Proyecto de Cooperación Agroforestal CATIE/GTZ se hace hincapié en la realización, promoción y estimulación de la investigación y especialmente en la capacitación de técnicos para el sector agroforestal.

Desde los inicios del Proyecto hemos contado con la cooperación y asesoría del Dr. H.W. Fassbender, Profesor de la Facultad Técnica Forestal en Gotinga, Rep. Federal de Alemania. En sus visitas anuales a Turrialba, el Dr. Fassbender ha guiado la investigación agroforestal a cargo del Proyecto y ha dictado cursos en la Escuela de Posgrado. Las notas de los cursos se han revisado, ampliado y actualizado cada año. En 1984 se publicó como contribución 21 de la Serie de Materiales de Enseñanza del CATIE la obra: Bases edafológicas de los sistemas de producción agroforestales. Esta obra se ha agotado rápidamente.

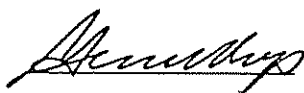
Ahora tenemos el agrado de presentar una nueva edición sobre la materia que aparece bajo el título MODELOS EDAFOLOGICOS DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES. El autor ha ampliado notablemente la obra en función de los resultados crecientes sobre la investigación en sistemas agroforestales obtenidos a nivel mundial.

Deseamos enfatizar que esta obra es un ejemplo excelente de la magnífica cooperación entre el CATIE y la GTZ. Ambas instituciones han logrado desde 1981 muy buenos resultados en el desarrollo del sector agroforestal. Este libro amplía la lista numerosa de publicaciones de seminarios, cursos cortos, descripciones técnicas de sistemas agroforestales y proyecciones regionales con prácticas y técnicas agroforestales.

Felicitemos y agradecemos al Dr. Fassbender por el esfuerzo realizado, esperamos que este documento sea de utilidad para los investigadores en el campo agroforestal. También deseamos agradecer a todos los estudiantes y personas que cooperaron con el autor para la preparación de la obra, especialmente a Lilliam Ugalde de Brenes, Maritza Loaiza de Brenes, Priscilla Mora de Vega por el trabajo secretarial, a Emilio Ortíz por los trabajos de arte y a Carmen Rojas y Alejandro Imbach por la labor editorial.

A los lectores que tengan sugerencias sobre la obra les agradeceríamos tomar contacto con el autor (Prof. Dr. H.W. Fassbender Kramberg 12, 3406 Bovenden-Lenglern, República Federal de Alemania).

Deseamos que la obra tenga una divulgación muy amplia en el sector agroforestal latinoamericano.



Dr. Jochen Heuveldop
Coordinador del Proyecto
entre 1980 y 1986



Dr. Arnim Bonnemann
Coordinador del Proyecto
a partir de 1987

Turrialba, Costa Rica
Febrero 1987

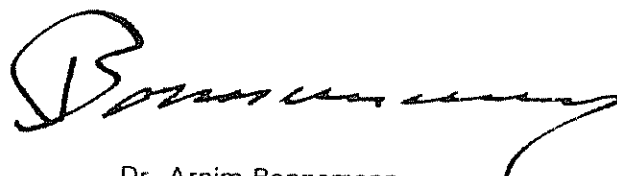
PROLOGO A LA SEGUNDA EDICION

Después de cinco años de grandes avances en la investigación agroforestal el Dr. H.W. Fassbender, Profesor de la Facultad Técnica Forestal de Gotinga, Alemania y Consultor del Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ ha preparado una nueva edición de MODELOS EDAFOLOGICOS DE SISTEMAS AGROFORESTALES.

Con esta segunda edición de la obra, completamente revisada y ampliada con los nuevos resultados de la investigación agroforestal, presentamos un nuevo aporte agroforestal del CATIE y GTZ, en una fase muy importante del Proyecto, en el cual desde hace más de 12 años existe una cooperación muy intensiva.

Agradecemos al Dr. Fassbender por su especial interés en actualizar y complementar la obra. Su realización ha sido además factible con el apoyo secretarial de Lilliam Ugalde de Brenes, Rosaura Solano de Ramírez y Grace Ortega de Castro y artístico de Emilio Ortíz. Además se agradece la magnífica labor editorial de INFORAT: de Claudia Monge, Líder del Proyecto; de Emilio Hidalgo de Caviedes, Editor y la revisión bibliográfica de Carlos Granados, Documentalista.

Esperamos que la obra tenga una amplia aceptación en el medio agroforestal latinoamericano.



Dr. Arnim Bonnemann
Líder Proyecto Agroforestal
CATIE/GTZ

Turrialba, Costa Rica
Diciembre 1992

INDICE DE CONTENIDO

	Página
PROLOGO A LA PRIMERA EDICION	iii
PROLOGO A LA SEGUNDA EDICION	v
INDICE DE CONTENIDO	vii
INDICE DE FIGURAS	xviii
INDICE DE CUADROS.....	xxviii
1 EL ECOSISTEMA NATURAL, LOS RECURSOS NATURALES, LOS AGROECOSISTEMAS Y SUS MODELOS EDAFOLOGICOS	1
1.1 La biosfera	1
1.2 El concepto de ecosistema	2
1.2.1 Límites.....	3
1.2.2 Entradas y salidas.....	4
1.2.3 Componentes abióticos	4
1.2.4 Componentes bióticos.....	6
1.2.5 Interrelaciones bióticas.....	7
1.2.6 Interrelaciones abióticas	10
1.3 Los recursos naturales	10
1.4 Los ecosistemas artificiales o agroeco- sistemas	12
1.5 La necesidad de la conservación de los recursos naturales y los ecosistemas	13

	Página
1.6 El modelaje de los ecosistemas	15
1.6.1 Técnicas de modelaje	15
1.6.2 Simbología de los diagramas de flujo	18
1.6.3 Modelos edafológicos de los ecosistemas.....	22
RESUMEN.....	27
LITERATURA.....	28
2 LOS AGROECOSISTEMAS, CON ESPECIAL REFERENCIA A LOS SISTEMAS DE PRODUCCION AGROFORESTALES.....	30
2.1 Los agroecosistemas de América Latina.....	30
2.2 Los sistemas de agricultura en América Latina.....	38
2.3 La necesidad de la agricultura soste- nida	40
2.4 El modelaje de agroecosistemas	41
2.5 Sistemas de producción agroforesta- les	43
2.5.1 Conceptos generales, definicio- nes.....	43
2.5.2 Clasificación de los sistemas agroforestales.....	45
2.6 Especies en sistemas agroforestales (árboles asociados con cultivos).....	53
2.6.1 Aspectos generales, ventajas	53

	Página
2.6.2 Arboles en rotaciones agrícolas (Sistema Taungya).....	60
2.6.3 Arboles de madera comercial en cultivos	63
2.6.4 Arboles frutales asociados con cultivos.....	66
2.6.5 Arboles de sombra en cultivos.....	68
2.6.6 Cercas vivas, cortinas rompevientos y cultivos en fajas ("alley cropping")	70
2.6.7 Sistemas agroforestales múlti- ples.....	72
2.6.8 Huertos familiares.....	79
2.7 Especies en sistemas silvopastoriles (árboles asociados con pastizales) y agrosilvopastoriles (árboles asociados con cultivos y pastizales)	86
2.7.1 Aspectos generales, ventajas	86
2.7.2 Pastoreo o producción de fo- rraje en plantaciones forestales o en bosques secundarios	90
2.7.3 Arboles (maderables, forrajeros, frutales) asociados con pastizales	92
2.7.4 Cercas vivas y cortinas rompevientos en pastizales	96
2.7.5 Arboles fijadores de nitrógeno en pastizales.....	96
2.8 El modelaje de los sistemas agro- forestales	97

	Página
2.8.1 Aspectos generales.....	97
2.8.2 Modelo de un sistema silvo- pastoril	98
2.8.3 Modelo de un sistema agrofo- restal.....	100
RESUMEN.....	102
LITERATURA	102
3 EL CICLO DEL AGUA	115
3.1 El agua en la naturaleza.....	115
3.1.1 Ciclo general del agua	115
3.1.2 El agua y la vegetación.....	115
3.1.3 Los diagramas climáticos.....	118
3.1.4 El balance hídrico climático	119
3.2 El agua en el suelo	123
3.2.1 Aspectos generales.....	123
3.2.2 Constantes de humedad del suelo	125
3.2.3 Movimiento del agua.....	127
3.3 Ciclo del agua en ecosistemas.....	128
3.3.1 Aspectos generales.....	128
3.3.2 Ejemplos del ciclo del agua en ecosistemas forestales	129

	Página
3.3.3 Deposición y transferencia de elementos químicos con el agua.....	133
3.4 El agua en agroecosistemas y sistemas agroforestales.....	136
3.4.1 Necesidades de agua	136
3.4.2 Ciclo del agua en sistemas agro- forestales	138
3.4.3 Elementos nutritivos en la solución del suelo de sistemas agroforestales	152
3.4.4 Lixiviación de elementos nutri- tivos en sistemas agrofores- tales	152
3.4.5 Competencia por agua y cosechas en sistemas agrofo- restales.....	157
RESUMEN.....	158
LITERATURA.....	159
4 CICLO DE LA MATERIA ORGANICA.....	165
4.1 La materia orgánica en el suelo	165
4.1.1 Aspectos generales.....	165
4.1.2 Composición de la materia orgá- nica.....	166
4.1.3 La capa de mantillo.....	168
4.1.4 El humus en el suelo mineral.....	169

4.1.5	Análisis de la materia orgánica del suelo	173
4.1.6	Importancia del humus en el suelo	174
4.2	Ciclo de la materia orgánica en ecosistemas forestales	176
4.2.1	Contenido de materia orgánica en ecosistemas tropicales	176
4.2.2	Producción y descomposición de residuos vegetales	190
4.2.3	Productividad de los ecosistemas	200
4.2.4	Modelo del ciclo de la materia orgánica	202
4.3	La materia orgánica en agroecosistemas	205
4.3.1	Tala, quema, agricultura migratoria	205
4.3.2	Materia orgánica en sistemas de producción agrícola y pecuaria	211
4.3.3	Manejo agronómico de la materia orgánica	215
4.3.4	Materia orgánica en bosques secundarios	221
4.3.5	Materia orgánica en plantaciones forestales	224

	Página
4.4 Materia orgánica en sistemas de producción agroforestales	230
4.4.1 Modelo de sistemas agrofore- tales	230
4.4.2 Materia orgánica en sistemas de café con árboles de sombra	232
4.4.3 Materia orgánica en sistemas de cacao con árboles de som- bra	253
4.4.4 Aspectos de la sostenibilidad de los sistemas agroforestales de café y cacao con árboles	275
4.4.5 Aspectos del impacto en el medio ambiente de los sistemas agroforestales de café y cacao con árboles de sombra	276
4.4.6 Materia orgánica en sistemas agroforestales de cultivos en fa- jas ("alley cropping") o en calle- jones ("hedgerow cropping")	278
4.4.7 Materia orgánica en praderas con árboles de sombra	285
4.4.8 Materia orgánica en otros sistemas agroforestales	289
RESUMEN	295
LITERATURA	296
5 CICLO DEL NITROGENO	313
5.1 El nitrógeno en el suelo	313
5.1.1 Contenido de N en el suelo	313

5.1.2	Formas del N en el suelo	314
5.1.3	Ciclo del N en la naturaleza, con énfasis en el suelo	314
5.2	El nitrógeno en ecosistemas natura- les	318
5.2.1	Ciclos bioquímicos, geoquímicos y biogeoquímicos	318
5.2.2	Acumulación de nitrógeno en ecosistemas.....	318
5.2.3	Transferencia del nitrógeno en los ecosistemas.....	320
5.2.4	Modelos de ciclos del N.....	322
5.2.5	Parámetros de cuantificación del ciclo del N en ecosistemas	325
5.3	El nitrógeno en agroecosistemas	330
5.3.1	Efecto del fuego sobre el nitró- geno.....	330
5.3.2	El nitrógeno en los agroeco- sistemas	331
5.3.3	El nitrógeno en plantaciones forestales	339
5.4	El nitrógeno en sistemas agrofores- tales.....	343
5.4.1	Aspectos generales.....	343
5.4.2	Sistemas de café con árboles de sombra	343
5.4.3	Sistemas de cacao con árboles de sombra	354

	Página
5.4.4 Plantas de cobertura bajo árboles	373
5.4.5 Sistemas de praderas bajo árboles de sombra	375
5.4.6 Sistemas de cultivo en callejones ("alley cropping")	380
RESUMEN	382
LITERATURA	383
6 EL CICLO DEL FOSFORO	395
6.1 El fósforo en el suelo	395
6.1.1 Contenido del fósforo en el suelo	395
6.1.2 Formas de P en el suelo	395
6.2 Ciclo del fósforo en ecosistemas naturales.....	398
6.2.1 Acumulación y transferencias	398
6.2.2 Modelos de los ciclos del fósforo.....	400
6.3 El fósforo en agroecosistemas.....	403
6.3.1 Necesidades de P de los cultivos.....	403
6.3.2 Fertilización y fijación de P en los suelos.....	404
6.3.3 El fósforo en plantaciones forestales.....	406

	Página
6.4 El fósforo en sistemas de producción agroforestales.....	407
6.4.1 Aspectos generales.....	407
6.4.2 Sistemas de café con árboles de sombra.....	408
6.4.3 Sistemas de cacao con árboles de sombra.....	412
6.4.4 Sistemas de pradera bajo árboles de sombra.....	418
6.4.5 Sistemas de cultivo en callejones ("alley cropping").....	420
RESUMEN.....	422
LITERATURA.....	423
7 CICLOS DEL POTASIO, CALCIO, MAGNESIO Y ALUMINIO.....	430
7.1 Elementos metálicos en el suelo.....	430
7.1.1 Contenido y formas.....	430
7.1.2 Los procesos de intercambio catiónico.....	432
7.1.3 El encalado de los suelos.....	434
7.2 Ciclos en ecosistemas naturales.....	435
7.2.1 Acumulación y transferencias.....	435
7.2.2 Modelos de los ciclos.....	437

	Página
7.3 Ciclos en agroecosistemas.....	440
7.3.1 Efecto de la tumba y quema de bosques sobre el K, Ca y Mg	440
7.3.2 Necesidades de los cultivos	440
7.3.3 Ciclos en sistemas de plantaciones forestales	441
7.4 Ciclos en sistemas de producción agroforestales.....	443
7.4.1 Aspectos generales.....	443
7.4.2 Sistemas de café con árboles de sombra	443
7.4.3 Sistemas de cacao con árboles de sombra.....	451
7.4.4 Sistemas de praderas bajo árboles de sombra	458
7.4.5 Sistemas de cultivo en callejones ("alley cropping")	461
RESUMEN	463
LITERATURA.....	464
INDICE DE ESPECIES.....	471
INDICE DE MATERIAS	484

	Página
6.4 El fósforo en sistemas de producción agroforestales.....	407
6.4.1 Aspectos generales.....	407
6.4.2 Sistemas de café con árboles de sombra.....	408
6.4.3 Sistemas de cacao con árboles de sombra.....	412
6.4.4 Sistemas de pradera bajo árboles de sombra.....	418
6.4.5 Sistemas de cultivo en callejones ("alley cropping").....	420
RESUMEN.....	422
LITERATURA.....	423
7 CICLOS DEL POTASIO, CALCIO, MAGNESIO Y ALUMINIO.....	430
7.1 Elementos metálicos en el suelo.....	430
7.1.1 Contenido y formas.....	430
7.1.2 Los procesos de intercambio catiónico.....	432
7.1.3 El encalado de los suelos.....	434
7.2 Ciclos en ecosistemas naturales.....	435
7.2.1 Acumulación y transferencias.....	435
7.2.2 Modelos de los ciclos.....	437

	Página
7.3 Ciclos en agroecosistemas.....	440
7.3.1 Efecto de la tumba y quema de bosques sobre el K, Ca y Mg	440
7.3.2 Necesidades de los cultivos	440
7.3.3 Ciclos en sistemas de planta- ciones forestales	441
7.4 Ciclos en sistemas de producción agro- forestales.....	443
7.4.1 Aspectos generales.....	443
7.4.2 Sistemas de café con árboles de sombra	443
7.4.3 Sistemas de cacao con árboles de sombra.....	451
7.4.4 Sistemas de praderas bajo árboles de sombra	458
7.4.5 Sistemas de cultivo en callejones ("alley cropping")	461
RESUMEN.....	463
LITERATURA.....	464
INDICE DE ESPECIES.....	471
INDICE DE MATERIAS.....	484

INDICE DE FIGURAS

	Página
1.1 La biosfera en la naturaleza (según Fassbender, 4)	2
1.2 El ecosistema natural y sus componentes (según Fassbender, 4).....	3
1.3 Secuencia en un modelo del proceso de fotosíntesis (adaptado y resumido de Wilson y Loomis, 1968; tomado de Hart, 12).....	17
1.4 Una región es como un sistema que incluye componentes físicos, bióticos y socio-económicos que interactúan formando procesos primarios (silvicultura, agricultura, etc.), secundarios (industria, construcción, etc.), y terciarios (escuelas, bancos, etc.) (según Hart, 12).....	18
1.5 Un ecosistema representado como un diagrama de circuitos, usando la simbología de Odum (16, 18).	23
1.6 Representación esquemática de un ecosistema natural forestal y el modelo de la materia orgánica (según Fassbender, 4)	23
1.7 Componentes del modelo del agua en un ecosistema natural forestal (según Fassbender y Grimm, 3; Grimm y Fassbender, 11).....	24
1.8 Bases del modelo de los elementos químicos en un ecosistema forestal natural (adaptado de Fassbender, 4; ver también 2, 3, 10, 11).	24

2.1	Modelaje de los agroecosistemas de una finca (56, 96, ver en 11).....	42
2.2	Algunas especies frecuentes en sistemas agroforestales (Fassbender, 49).....	57
2.3	Modelo de la materia orgánica de un sistema silvopastoril con los símbolos de Odum (89) (preparado por el autor).....	99
2.4	Representación esquemática de un sistema agroforestal de cacao-plátano-poró y el modelo de su materia orgánica y de los elementos nutritivos (según Fassbender, 49, ver también 48).....	101
3.1	Ciclo del agua en la naturaleza (según Gavande, 19).....	116
3.2	Relaciones entre la precipitación pluvial y la vegetación (según Fölster y Fassbender, 16).....	117
3.3	Diagramas climáticos de algunos lugares de Costa Rica (según Walter y Lieth, 56).....	119
3.4	Representación esquemática de las mediciones de flujo de agua en el ecosistema (sin escala) y valores encontrados en San Eusebio, Venezuela (I.m), (según Grimm y Fassbender, 21).	132
3.5	Ciclo del agua en sistemas agroforestales y medición de sus variables (según Imbach <u>et al</u> , 32).....	139
3.6	Correlación entre interceptación y precipitación en los sistemas <u>T. cacao</u> y <u>C. alliodora</u> o <u>E. poeppigiana</u> (Imbach <u>et al</u> , 32).....	146

3.7	Variación anual de la lluvia y del contenido de agua en el suelo de un sistema agroforestal de café con laurel en Turrialba, Costa Rica (Imbach <u>et al</u> , 32).....	147
3.8	Ajuste del modelo de balance hídrico de los sistemas agroforestales estudiados (Imbach <u>et al</u> , 32).....	148
3.9	Contenido de agua del suelo calculado en base a los valores de evaporación (°) y determinado (°) bajo un sistema agroforestal de café en Kenia (según Pereira, 43).....	151
3.10	Variación de las concentraciones de N y Ca en el agua percolante de los sistemas café/poró y café/laurel (mg.l^{-1} ; Imbach <u>et al</u> , 32).....	155
3.11	Relación entre la distancia de una hilera de árboles de eucalipto, d y: a. extracción de humedad para una profundidad de suelo de 0-150 cm, EM; b. número de plantas de mostaza/m ² , P; c. rendimiento Y de mostaza; d. rendimiento Y de trigo (Malik y Sherma, 40).....	157
4.1	Reservas orgánicas de diferentes ecosistemas forestales tropicales (t.ha^{-1} ; según diferentes autores).....	180
4.2	Distribución de la materia orgánica en ecosistemas tropicales (según Fassbender, 49).....	192

4.3	Ciclo de la materia orgánica en el ecosistema montano de San Eusebio, Venezuela (adaptado de Grimm y Fassbender; Fassbender y Grimm, 50, 51, 74, 75; reservas $t \cdot ha^{-1}$; transferencias $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$).....	203
4.4	Ejemplos de descensos de rendimiento en cultivos continuos de agricultura migratoria (según Sánchez, 145).....	207
4.5	Modelo de los cambios de la fertilidad del suelo al transformar la vegetación de bosque en pradera (según Toledo y Serrao, 163).....	208
4.6	Cambios de la materia orgánica (% C) y de la capacidad de intercambio catiónico (CIC, meq. $100 g^{-1}$) de bosque a 3, 12, 46 y 90 años de uso agrícola, en Casamance, Senegal (según Siband, 149).....	209
4.7	Representación esquemática de la fertilidad de los suelos en función del sistema de explotación agrícola (según Fassbender y Bornemisza, 54).....	209
4.8	Enriquecimiento del barbecho con diferentes manejos agronómicos (según Prinz, 135).....	216
4.9	Biomasa y elementos nutritivos en bosques secundarios (según Fölster y Fassbender, 60).....	223
4.10	Producción de madera de <u>Cupressus lusitanica</u> en Antioquía, Colombia en función del "sitio forestal" ($m^3 \cdot ha^{-1}$, según Tschinkel, 164; ver también Fassbender y Tschinkel, 47).....	226

4.11	Materia orgánica en la biomasa, la hojarasca y el suelo (0-50 cm) durante una rotación de <u>Pinus patula</u> en Tanzania (según Lundgren, 117).....	236
4.12	Producción de residuos vegetales de café bajo poró, datos mensuales y anuales (kg ha^{-1} ; según Heuvel dop <u>et al</u> , 83).....	241
4.13	Producción natural de residuos del poró como sombra del café, datos mensuales y anuales (kg ha^{-1} ; según Heuvel dop <u>et al</u> , 83).....	243
4.14	Descomposición de los residuos de café con poró y café con laurel (% remanente de la muestra; según Heuvel dop <u>et al</u> , 83).....	246
4.15	Modelo de la materia orgánica de los sistemas agroforestales de café (<u>Coffea arabica</u>) asociado con laurel (<u>Cordia alliodora</u>) y con poró (<u>Erythrina poeppigiana</u>) (reservas t ha^{-1} ; transferencias $\text{t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$; según Fassbender y Alpfzar, 55, Fassbender <u>et al</u> , 53).....	247
4.16	Producción de cacao bajo sombra de laurel y poró (materia seca de almendras y cáscara; $\text{t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$; basado en datos de Béer <u>et al</u> , 12, 13; Fassbender <u>et al</u> , 59; Heuvel dop <u>et al</u> , 84).....	249
4.17	Crecimiento (altura y DAP) de <u>Cordia alliodora</u> como sombra de <u>Theobroma cacao</u> (preparado por el autor, aún no publicado).....	263
4.18	Producción de residuos naturales de los sistemas <u>T.cacao/C.alliodora</u> y <u>T.cacao/E.poeppigiana</u> (materia seca $\text{t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$; Imbach <u>et al</u> , 91).....	267

4.19	Modelo para la distribución y transferencia de materia orgánica en el sistema <u>Theobroma cacao</u> - <u>Cordia alliodora</u> (reservas $t.ha^{-1}$; transferencias $t.ha^{-1}.a^{-1}$). (Beer <u>et al</u> , 12, 13; Fassbender <u>et al</u> , 59).....	272
4.20	Modelo para la distribución y transferencia de materia orgánica en el sistema <u>Theobroma cacao</u> - <u>Erythrina poeppigiana</u> (reservas $t.ha^{-1}$; transferencias $t.ha^{-1}.a^{-1}$) (Beer <u>et al</u> 12, 13; Fassbender <u>et al</u> , 59).....	273
4.21	Efecto de leucaena en hileras sobre la producción del maíz (1979-1984) en comparación con la fertilización nitrogenada (1984) (según IITA, 89).....	282
4.22	Efecto de las cosechas sucesivas en la producción de sistemas agroforestales de callejones en Nigeria (Lal, 113, 114).....	283
4.23	Efecto de las cosechas sucesivas de sistemas agroforestales de callejones sobre el humus del suelo (Lal, 113, 114).....	284
4.24	Producción de biomasa aérea de leguminosas en callejones de sistemas agroforestales (Szott <u>et al</u> , 155).....	290
4.25	Producción acumulativa de biomasa de podas en sistemas agroforestales de callejones (Szott <u>et al</u> , 155).....	290
4.26	Producción de materia seca de King grass con poró de acuerdo a la densidad de siembra y frecuencia de podas (1984, $t.ha^{-1}.a^{-1}$) y de cada una de las podas del poró ($t.ha^{-1}$) (según Rodríguez, 140).....	291

5.1	Representación esquemática del ciclo del nitrógeno en la naturaleza (según Stevenson, 110; adaptado de Fassbender y Bornemisza, 37)	315
5.2	Ciclo del N en el ecosistema de San Eusebio, Venezuela (reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; según Fassbender y Grimm, 34)	323
5.3	Cambios del N al transformar el bosque primario en un agrosistema de "Conuco" en la región amazónica de Venezuela (según Jordan <u>et al</u> , 73)	335
5.4	Cambios del N al transformar el bosque primario en una plantación de pino caribe, en Jari, Brasil (según Jordan y Russell, 72, 74)	342
5.5	Modelos del ciclo de N en los sistemas agroforestales de café con laurel y café con poró en Turrialba, Costa Rica (reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; según Alpízar <u>et al</u> , 2; Fassbender <u>et al</u> , 36; Heuveldop <u>et al</u> , 60)	345
5.6	Modelo del N en café con sombra de leguminosas en La Cumana, Venezuela (reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; según Aranguren <u>et al</u> , 6; Herrera <u>et al</u> , 59)	353
5.7	Modelo quinquenal del nitrógeno (1983 a 1987), seis a 10 años de edad del sistema agroforestal de cacao/laurel. Reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (según valores de Alpízar <u>et al</u> , 3; Beer <u>et al</u> , 11, 12; Fassbender <u>et al</u> , 40, 41; Imbach <u>et al</u> , 62, 63 y valores provisionales aún no publicados)	357

5.8	Modelo quinquenal del nitrógeno (1983 a 1987), seis a 10 años de edad del sistema agroforestal de cacao/poró. Reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (según valores de Alpizar <u>et al</u> , 3; Beer <u>et al</u> , 11, 12; Fassbender <u>et al</u> , 40, 41; Imbach <u>et al</u> , 62, 63 y valores provisionales aún no publicados)	358
5.9	Variación y promedio del contenido de nitrógeno en las hojas de los residuos de cacao, laurel y poró (porcentaje, según Imbach <u>et al</u> , 1991).....	364
5.10	Variaciones de N-total y $\text{NO}_3\text{-N}$ en el agua del suelo en función de la poda del poró y las lluvias ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$; según Alpizar <u>et al</u> , 3; Fassbender <u>et al</u> , 40).....	369
5.11	Reservas y transferencia de N en el experimento de cultivo de maíz en callejones de poró (<i>Erythrina poeppigiana</i>) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en CATIE, Costa Rica (Sánchez, 102).....	372
6.1	Ciclo del fósforo en el ecosistema de llanura de Darién, Panamá (según Golley <u>et al</u> , 30; reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$).....	401
6.2	Ciclo del fósforo en el ecosistema montano de San Eusebio, Mérida, Venezuela (según Fassbender y Grimm, 19, 20, 32, 33; reservas en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$).....	402
6.3	Modelos del ciclo de fósforo en los sistemas agroforestales de café con laurel y café con poró en Turrialba, Costa Rica (reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; Alpizar <u>et al</u> , 1; Fassbender <u>et al</u> , 22; Heuvelink <u>et al</u> , 36).....	410

6.4	Modelos quinquenales (1983-1987) del ciclo del P en los sistemas agroforestales de cacao con laurel y cacao con poró en Turrialba, Costa Rica (reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, en base a valores de Alpízar <u>et al</u> , 2; Beer <u>et al</u> , 4, 5, 6; Fassbender <u>et al</u> , 26, 27; Heuvel dop <u>et al</u> , 37; Imbach <u>et al</u> , 38, 39 y valores provisionales aún no publicados).	416
6.5	Reserva y transferencia de P en el experimento de cultivos de maíz en callejones de poró (<i>Erythrina poeppigiana</i>) en CATIE, Costa Rica ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) (Sánchez, 58).	421
7.1	Ciclo del potasio en el ecosistema de Caatinga en San Carlos de Río Negro, Venezuela (Jordan y Herrera, 41) (Dimensiones: reservas en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$).	438
7.2	Modelo del ciclo del aluminio en el ecosistema forestal de San Eusebio, Venezuela (según Fassbender y Grimm; reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$).	439
7.3	Modelos del ciclo del potasio de los sistemas agroforestales de café con laurel y café con poró en Turrialba, Costa Rica (según Alpízar <u>et al</u> , 1; Fassbender <u>et al</u> , 19; Heuvel dop <u>et al</u> , 36; reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$).	445
7.4	Ciclo del potasio (1983-1987) para el sistema de cacao/con laurel en CATIE, Costa Rica (reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, en base a valores de Alpízar <u>et al</u> , 2; Fassbender <u>et al</u> , 24, 25; Imbach <u>et al</u> , 34 y valores provisionales aún no publicados).	452

7.5	Cambios del potasio cambiante en el suelo bajo sistema cacao/poró en 10 años experimentales (1977-1987) (meq.100g ⁻¹ , kg.ha ⁻¹ , valores provisionales aún no publicados).....	456
7.6	Reserva y transferencia de K de cultivos de maíz en callejones de poró (<u>Erythrina poeppigiana</u>) en CATIE (kg ha ⁻¹ , Sánchez, 54).....	462

INDICE DE CUADROS

	Página
2.1 Clasificación de los principales sistemas agroforestales según sus funciones (23, 33).....	47
2.2 Principales sistemas agroforestales según su distribución en el tiempo y en el espacio (según Combe y Budowski, 33).....	49
2.3 Clasificación de los sistemas agroforestales (33) (ampliado por el autor).....	52
2.4 Productos utilizados de algunas especies potenciales de uso múltiple en sistemas agroforestales (según Nair, 86).	54
2.5 Especies arbóreas en bosques naturales, cafetales y pastizales y su uso para madera y leña en Acosta y Puriscal, Costa Rica (según Heuveldop y Espinoza, 58) (orden alfabético).	55
2.6 Sistemas silvopastoriles y agrosilvopastoriles en pequeñas fincas de Costa Rica (Avila <u>et al</u> , 10).....	87
2.7 Razones dadas por los productores para mantener el bosque en sus fincas (Avila <u>et al</u> , 10).	88
2.8 Especies arbóreas encontradas en pastizales de la región Pacífico Seco de Costa Rica (Beer y Somarriba, 16).	93
2.9 Características nutritivas de las hojas de especies arbóreas para alimentación de cabras (según Benavides, 20).....	96

3.1	Ejemplo del balance hídrico en Turrialba, Costa Rica incluyendo algunos datos climáticos importantes para la evapotranspiración (según CATIE, 8).....	122
3.2	Clasificación de las partículas del suelo (según Gavande, 19)	123
3.3	Valor promedio anual de pH y elementos químicos (mg.l^{-1}) en el agua de diferentes niveles de transferencia en el ecosistema de San Eusebio, Venezuela (según Grimm y Fassbender, 22).....	134
3.4	Transferencia de elementos químicos con el ciclo hidrológico ($\text{kg.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) (según diferentes autores).....	135
3.5	El PH y la concentración de elementos nutritivos (kg.l^{-1}) en el agua de diferentes ciclos biogeoquímicos de la Amazonia Central (según Brinkmann, 6).....	137
3.6	Valor aproximado de la evapotranspiración anual (mm) de algunos cultivos (según Doorenbos y Pruitt, 9).....	140
3.7	Curva de tensión de agua y agua disponible en los suelos del Experimento Central de CATIE, Turrialba, Costa Rica (32).....	145
3.8	Balance hídrico de sistemas agroforestales estudiados en Costa Rica, período octubre 1983 a setiembre 1987, precipitación anual 2004 mm (Imbach <i>et al.</i> , 32).....	149
3.9	Balance hídrico de cultivares de café (<i>Coffea arabica</i>) en Kenia (según Pereira, 43; seis años de estudio; $1.\text{m}^{-2}$ ó mm).....	150

3.10	Balance hídrico en una plantación de palmera aceitera de 11 años en Yangambi, Zaire (según Ringoet, citado por Ferweda, 15; mm)	151
3.11	Concentración de elementos nutritivos en la solución del suelo alrededor del tronco de árboles de poró y laurel asociados con cacao en Turrialba, Costa Rica (mg.l^{-1}) (datos no publicados)	153
3.12	Concentración de elementos nutritivos en el agua de lixiviación en sistemas agroforestales estudiados en Turrialba, Costa Rica (promedio de 200-238 muestras por elemento, mg.l^{-1}) (según Imbach <u>et al</u> , 32)	154
3.13	Lixiviación de elementos nutritivos en sistemas agroforestales de café y cacao con sombra de poró o laurel (1983-1987) ($\text{Kg.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$; Imbach <u>et al</u> , 32)	156
4.1	Contenido de C y N en algunos suelos de América Latina. (Fassbender y Bornemisza, 54)	171
4.2	Reservas orgánicas (t.ha^{-1}) y minerales (kg.ha^{-1}) en el ecosistema forestal de San Eusebio, Venezuela (promedio de 13 parcelas) (según Grimm y Fassbender, 74)	181
4.3	Concentraciones de elementos químicos en algunos compartimentos (g.kg^{-1} materia seca) (según Grimm y Fassbender, 74)	182
4.4	Reservas orgánicas (t.ha^{-1}) y minerales (kg.ha^{-1}) en los cuatro sitios forestales (según Grimm y Fassbender, 74)	184

4.5	Reservas de materia orgánica de ecosistemas forestales tropicales montañosos ($t \cdot ha^{-1}$; diferentes autores).....	186
4.6	Reservas de materia orgánica de ecosistemas forestales tropicales de llanura siempreverdes ($t \cdot ha^{-1}$; según diferentes autores).....	188
4.7	Reservas orgánicas promedio en ecosistemas forestales tropicales ($t \cdot ha^{-1}$; según Brown y Lugo, 20).....	189
4.8	Distribución porcentual de materia orgánica de elementos nutritivos en ecosistemas forestales (según Fassbender, 49).....	191
4.9	Resumen de los datos de producción de residuos vegetales de ecosistemas forestales ($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$; en paréntesis número de estudios calculados, con base en Proctor, 137).....	194
4.10	Producción de residuos vegetales de ecosistemas forestales tropicales seleccionados ($t \cdot ha^{-1}$) y transferencia de elementos nutritivos ($kg \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$) (según diferentes autores; ver Fassbender y Grimm 74; Proctor, 130).....	197
4.11	Producción primaria neta de algunos ecosistemas forestales tropicales ($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$; según Brown y Lugo, 20; Jordan, 100; fuentes originales de diferentes autores).....	201
4.12	Comportamiento del C y N en los suelos agrícolas bajo explotación. Disminución del contenido de C y N bajo diferentes condiciones climáticas y sistemas de cultivos (según Jagnow; ver Fassbender y Bornemisza, 54).....	210

4.13	Producción de materia orgánica y remoción de nutrimentos por los principales cultivos tropicales (según Sánchez, 145).....	212
4.14	Producción de materia seca de 15 leguminosas utilizadas como abonos verdes en Brasil (según Vaz, <i>et al</i> , en FAO, 45).....	220
4.15	Características de los componentes arbóreos de bosques secundarios tropicales (según Budowski, 23; ver también Fournier, 65)	222
4.16	Incremento de madera en plantaciones forestales tropicales ($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$; según la recopilación de Jordan, 100).....	225
4.17	Biomasa de <i>Eucalyptus glauca</i> a la edad de ocho años en Turrialba, Costa Rica ($t \cdot ha^{-1}$; según Navarro, 128).....	227
4.18	Biomasa de plantaciones de pino caribe (<i>Pinus caribaea</i>) en Ibadán, Nigeria ($t \cdot ha^{-1}$; según Egunjobi y Bada, 40)	228
4.19	Biomasa aérea y de raleo y elementos nutritivos en una rotación de 40 años de <i>Agathis dammara</i> en Java, Indonesia ($t \cdot ha$ ó $kg \cdot ha^{-1}$; según Bruijnzeel y Wiersum, 22).....	229
4.20	Características químicas de los suelos del Experimento Central de CATIE, Turrialba, Costa Rica (tratamiento café con poró, promedio de cuatro muestras; según Alpizar, <i>et al</i> , 2).....	234

4.21	Reservas de materia orgánica de café (<u>Coffea arabica</u>) asociado con laurel (<u>Cordia alliodora</u>) y poró (<u>Erythrina poeppigiana</u>) a la edad de 4.5 años en Turrialba, Costa Rica ($t \cdot ha^{-1}$; según Alpízar <u>et al</u> , 3).....	235
4.22	Cuadro comparativo de fitomasa en diferentes sistemas agroforestales.....	238
4.23	Producción del café asociado con laurel y poró ($kg \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$; según Heuvel dop <u>et al</u> , 83; ver también en Fassbender <u>et al</u> , 53).....	239
4.24	Producción natural de residuos vegetales de café asociado con laurel y poró ($kg \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$; según Heuvel dop <u>et al</u> , 83).....	244
4.25	Producción de residuos naturales y de poda en sistemas de café con laurel y café con poró y su contenido de elementos nutritivos ($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ ó $kg \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$; según diferentes autores).....	245
4.26	Modelos para la predicción de biomasa de hojas y/o madera en ramas, de <u>Theobroma cacao</u> o <u>Cordia alliodora</u> con base en el área basal o el diámetro de las ramas (Beer <u>et al</u> , 12, 13).....	255
4.27	Reservas de biomasa en los sistemas agroforestales de cacao (<u>Theobroma cacao</u> con laurel (<u>Cordia alliodora</u>) o poró (<u>Erythrina poeppigiana</u>) a las edades de cinco y 10 años ($t \cdot ha^{-1}$) (Alpízar <u>et al</u> , 4; Beer <u>et al</u> , 12, 13; Fassbender <u>et al</u> , 59).....	257

4.28	Distribución de biomasa en los sistemas agroforestales de cacao (<u>Theobroma cacao</u>) - laurel (<u>Cordia alliodora</u>) y cacao con poró (<u>T. cacao</u> - <u>E. poeppigiana</u>) (% de totales respectivos) (Beer <u>et al</u> , 12, 13).....	259
4.29	Contenido de materia orgánica en el suelo y reservas de materia orgánica en los sistemas agroforestales <u>Theobroma cacao</u> - <u>Cordia alliodora</u> y <u>T. cacao</u> - <u>Erythrina poeppigiana</u> (según Beer <u>et al</u> , 12, 13)	261
4.30	Crecimiento de laurel (<u>Cordia alliodora</u>) asociado con cacao (<u>Theobroma cacao</u>) (según Beer, <u>et al</u> , 12, 13).....	264
4.31	Residuos naturales y residuos de podas en los sistemas agroforestales de <u>Theobroma cacao-Cordia alliodora</u> o <u>T. cacao-Erythrina poeppigiana</u> (materia seca, $t.ha^{-1}.a^{-1}$; período 1983-87)* (Imbach <u>et al</u> , 91).....	265
4.32	Productividad primaria neta (PPN) de los sistemas de cacao (<u>Theobroma cacao</u>)-con laurel (<u>Cordia alliodora</u>) o cacao (<u>T. cacao</u>) - con poró (<u>Erythrina poeppigiana</u>) (materia seca; $t.ha^{-1}.a^{-1}$).....	271
4.33	Cosechas de maíz y frijol en cultivos en callejones de <u>Erythrina poeppigiana</u> y <u>Gliricidia sepium</u> en Turrialba, Costa Rica ($Kg.ha^{-1}.a^{-1}$) (según Kass <u>et al</u> , 102, 103).....	280
4.34	Producción de biomasa, N, K, Ca y Mg en cada poda de <u>Erythrina poeppigiana</u> y de <u>Gliricidia sepium</u> de 18(1984) a 66 meses (1987). "La Montaña", Turrialba, Costa Rica (según Kass <u>et al</u> , 102, 103).....	281

4.35	Influencia de árboles sobre la producción y calidad del forraje que crece bajo ellos (según Daccaret y Blydenstein, 34).....	286
4.36	Biomasa de árboles de sombra y producción de pasto estrella (<i>Cynodon plectostochyus</i>) (según Alpizar et al, 3; Bronstein, 19).....	288
4.37	Crecimiento del jaúl (<i>Alnus acuminata</i>) asociado con pastos en Costa Rica (según Budowski, 24).	293
4.38	Crecimiento de los componentes arbóreos de sistemas Taungya en Turrialba, Costa Rica (ejemplos, según Budowski, 24).	294
5.1	Reservas y transferencias de N en ecosistemas forestales tropicales (según diferentes autores).....	321
5.2	Ingreso y egreso de elementos químicos en el compartimento de la vegetación y su "turnover" ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) (según Fassbender y Grimm, 34).....	326
5.3	Ingreso y egreso de elementos químicos en el ecosistema ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) y relación entre ingreso y reservas en la vegetación (años) (según Fassbender y Grimm, 53).....	328
5.4	Distribución de biomasa al momento de la cosecha en varios agroecosistemas de Tabasco, México ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$) (según Gliemann, 46).	332
5.5	Distribución de nitrógeno después de un año de manejo, en varios agroecosistemas, Tabasco, México ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) (según Gliemann, 46).	333

5.6	Remoción de N en diferentes sistemas de cultivos múltiples ($\text{kg.N.ha}^{-1}.\text{cultivo}^{-1}$) (según Jiménez, 67 y Castellanos, 22).....	335
5.7	Fijación del N por algunas plantas (ver Hamdi, en FAO 32)	338
5.8	Nitrógeno acumulado en diferentes plantaciones forestales (kg.ha^{-1} ; según diferentes autores).....	339
5.9	Balance del nitrógeno en rodales de <u>Pinus patula</u> y <u>Cupressus lusitanica</u> en Tanzania durante una rotación de 30 años (kg.ha^{-1} ; según Lundgren, 86).....	341
5.10	Concentración de N y otros elementos nutritivos en los componentes de la vegetación: de los sistemas café con laurel y café con poró (porcentaje, según Alpízar <u>et al</u> , 2) en Turrialba, Costa Rica.....	346
5.11	Reservas de nitrógeno acumuladas en la biomasa y el suelo de los sistemas de café con laurel y café con poró (kg.ha^{-1} ; según Alpízar <u>et al</u> , 2; Fassbender <u>et al</u> , 38).....	347
5.12	Contenido de elementos nutritivos en los residuos vegetales (%) de los sistemas café con laurel y café con poró y transferencias totales por año (según Alpízar, 1; Heuveldop <u>et al</u> , 60).	349
5.13	Contenido de elementos nutritivos en los compartimentos de la vegetación de los sistemas cacao con laurel y cacao con poró en Turrialba, Costa Rica (porcentaje; Alpízar <u>et al</u> , 3).	356

5.14	Reservas de nitrógeno acumuladas en la biomasa y el suelo de los sistemas cacao con laurel y cacao con poró ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; según Alpízar <u>et al</u> , 3; Beer <u>et al</u> , 11, 12; Fassbender <u>et al</u> , 40, 41 y valores provisionales aún no publicados).	360
5.15	Contenido de elementos nutritivos en los residuos vegetales (%) para los sistemas cacao con laurel y cacao con poró (según Alpízar <u>et al</u> , 3; Heuveldop <u>et al</u> , 61).	362
5.16	Transferencia de nitrógeno con residuos en los sistemas de cacao con árboles de sombra de laurel. Quinquenio 1982-87 ($\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) (Imbach <u>et al</u> , 62).	363
5.17	Cosecha ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$), contenido ($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$) y remoción de elementos nutritivos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) en los sistemas de cacao con laurel y cacao con poró (promedio de seis a 10 años; según Heuveldop <u>et al</u> , 61; Fassbender <u>et al</u> , 40, 41).	365
5.18	Ganancias y pérdidas de N del suelo en los sistemas agroforestales de cacao/laurel y cacao/poró en 10 años experimentales ($\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 10 \text{ a}^{-1}$) (según valores de Alpízar <u>et al</u> , 3; Beer <u>et al</u> , 10, 11; Fassbender <u>et al</u> , 40, 41, 42; Imbach <u>et al</u> , 62, 63 y valores provisionales aún no publicados).	368
5.19	Concentración de nitrógeno en el agua del suelo de los árboles de sombra (laurel y poró) del cacao (N total, $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$; según Fassbender <u>et al</u> , 40).	370
5.20	Contenido de elementos nutritivos en el sistema plantas de cobertura con caucho (<i>Hevea brasiliensis</i>) en Malaya ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; según RRIM - Planter's Bulletin, 100).	374

5.21	Transferencia de elementos nutritivos en el sistema plantas de cobertura - caucho en Malaya ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; según Rubber Research Institute of Malaysia, 100).	375
5.22	Contenido de elementos nutritivos en pasto estrella (<i>Cynodon plectostochyus</i>) sin sombra y bajo sombra de laurel y poró en Turrialba, Costa Rica (porcentaje; según Alpízar, 2).	377
5.23	Elementos nutritivos extraídos por podas del poró (<i>Erythrina poeppigiana</i>) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; en 1984; según Rodríguez, 97).	379
5.24	Remoción de elementos nutritivos por los sistemas de "King-grass" con y sin sombra de poró en Turrialba, Costa Rica ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; según Rodríguez, 97).	379
5.25	Disminución de N-total (%) en el suelo con y sin callejones agroforestales en un ultisol de Nigeria (Lal, 84).	381
6.1	Contenido y formas de P en algunos suelos de América Latina (según Fassbender y Bornemisza, 23).	396
6.2	Reservas ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y transferencias ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) P en ecosistemas forestales tropicales (según diferentes autores).	399
6.3	Balance de P en rodales de <i>Pinus patula</i> y <i>Cupressus lusitanica</i> en Tanzania en una rotación de 30 años ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; según Lundgren, 50).	407
6.4	Reservas de P acumuladas en la biomasa y el suelo de los sistemas de café con laurel y café con poró ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; según Alpízar et al, 1, Fassbender et al, 22).	409

6.5	Reservas de fósforo acumuladas en la biomasa de los sistemas cacao con laurel y cacao con poró ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; según Alpízar <u>et al</u> , 1; Beer <u>et al</u> , 5, 6; Fassbender <u>et al</u> , 21, 26, 27).....	415
6.6	Transferencia de P con los residuos naturales y de podas en los sistemas cacao/laurel y cacao/poró (según Imbach <u>et al</u> , 38; $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$).....	417
7.1	Capacidad de intercambio de algunos minerales arcillosos, óxidos amorfos y materia orgánica (según Fassbender y Bornemisza, 20).....	433
7.2	Reservas y transferencias de potasio en ecosistemas tropicales (según diferentes autores).....	436
7.3	Balance de K, Ca y Mg en rodales de <u>Pinus patula</u> y <u>Cupressus lusitanica</u> en Tanzania, durante una rotación de 30 años ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; según Lundgren, 47).....	442
7.4	Reservas de K acumuladas en la biomasa y el suelo de los sistemas de café con laurel y café con poró ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) según Alpízar, 1; Alpízar <u>et al</u> , 2; Fassbender <u>et al</u> , 19, 21, 22).....	444
7.5	Acumulación ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y transferencias ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) de Ca y Mg en los sistemas agroforestales de café con laurel y café con poró (según Alpízar <u>et al</u> , 1; Fassbender <u>et al</u> , 19, 22; Heuveloop <u>et al</u> , 36).....	449

7.6	Valores de las reservas de potasio en sistemas cacao/laurel y cacao/poró a los cinco y 10 años ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; Alpízar <i>et al.</i> , 2; Fassbender <i>et al.</i> , 25; valores provisionales)	454
7.7	Transferencias de potasio en sistemas de cacao/laurel y cacao/poró ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; quinquenio seis a 10 años) (según Fassbender <i>et al.</i> , 25; Imbach <i>et al.</i> , 34; valores provisionales aún no publicados)	455
7.8	Reservas de calcio y magnesio en sistemas cacao/laurel y cacao/poró a los cinco y 10 años ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; Alpízar <i>et al.</i> , 2; valores provisionales*)	458
7.9	Transferencia de calcio y magnesio en sistemas cacao/laurel y cacao/poró en el quinquenio de seis a 10 años de edad. (1983 - 1987) (valores provisionales, $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)	460

CAPITULO PRIMERO

EL ECOSISTEMA NATURAL, LOS RECURSOS NATURALES, LOS AGROECOSISTEMAS Y SUS MODELOS EDAFOLOGICOS

1.1 La biosfera

La naturaleza es muy heterogénea y consta de una serie de zonas que son muy diferentes entre sí; en su representación esquemática en la Figura 1.1 se pueden diferenciar la litosfera, la pedosfera, la biosfera, la hidrosfera y la atmósfera, como zonas de la naturaleza donde se desarrollan una serie de procesos y de transformaciones que son importantes para el hombre.

La litosfera (del griego litos, piedra o roca) es la zona interna de la corteza terrestre; las piedras o las rocas se clasifican en función de su formación o desde el punto de vista de sus características físicas y químicas. Los principales grupos de rocas, en función de su formación son las rocas magmáticas, las rocas sedimentarias y las rocas metamórficas. Las rocas son el material primario en la formación de los suelos y dan lugar a la pedosfera; nombre que se deriva igualmente del griego, donde pedon significa suelo. El suelo tiene características químicas, físicas, y biológicas que son de capital importancia.

Para el desarrollo de la biosfera (bios, en griego, vida), o sea las plantas, los animales y los otros organismos que la integran, el suelo ofrece los elementos nutritivos, el agua y el espacio radicular, en el que las plantas se sostienen, y de donde pueden absorber los elementos nutritivos y el agua que necesitan.

En la atmósfera (del griego atmos, capa de aire que circunda la tierra) se encuentran las cantidades necesarias de oxígeno para la respiración de todos los componentes bióticos; además, de la atmósfera provienen el CO₂ y el agua que se necesita para la fotosíntesis.

La hidrosfera es la zona del agua, su denominación viene también del griego hydro, agua. En la naturaleza existe un ciclo definido del agua en función de la evaporación de las superficies libres y de la transpiración por las plantas, pasando así, el agua que originalmente fue absorbida del suelo, a la atmósfera, formando nubes, desde las que el agua regresa nuevamente a la corteza terrestre en forma de lluvia. Este ciclo se cierra mediante el flujo del agua sobre el suelo o a través de la pedosfera, para llegar a los ríos de donde pasa a los mares.

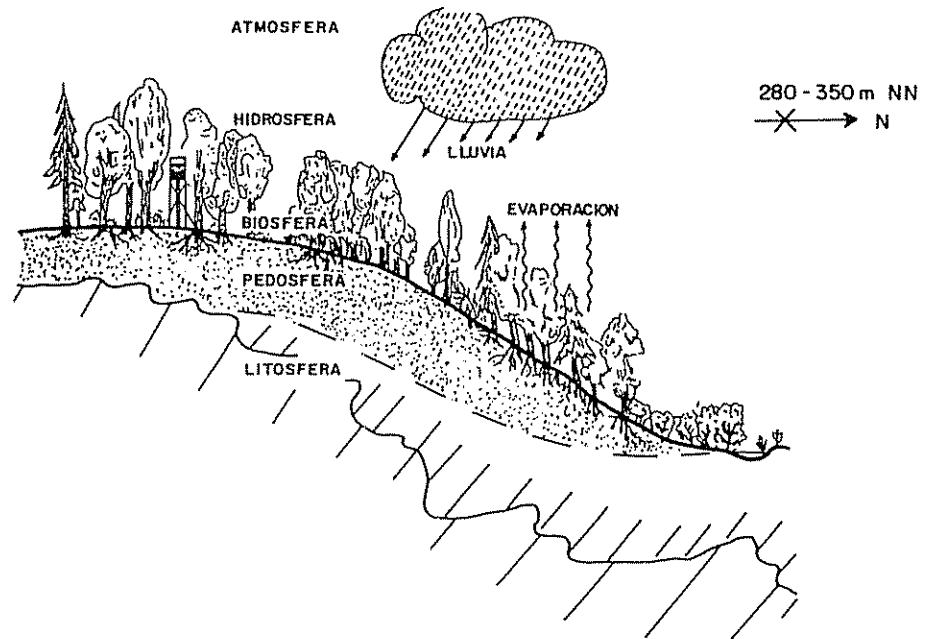


Figura 1.1. La biosfera en la naturaleza (según Fassbender, 4).

La biosfera, como se ha indicado, es una zona de la naturaleza donde se localizan todos los procesos de la vida o procesos bióticos; ella incluye plantas y animales de todas clases y éstos son muy heterogéneos. El hombre es parte de la biosfera y es, en principio, un organismo modificador de la misma, y busca utilizar todos los productos que ésta ofrece.

1.2 El concepto de ecosistema

El ecosistema es una parte de la biosfera definida en función de las interrelaciones entre los seres vivos y su medio ambiente. El concepto de ecosistema fue indicado primeramente por Tansley, un ecólogo inglés del siglo pasado (13, 16). El ecosistema es la unidad básica de observación de los procesos que ocurren en la biosfera. La naturaleza está ordenada en una jerarquía de sistemas de complejidad creciente, desde el nivel atómico hasta el ecosistema. En la ecología de sistemas, el ecosistema es la base unitaria de estructura y funcionamiento de la naturaleza. Los ecosistemas se caracterizan por tener una serie de elementos definidos y muy bien establecidos; ellos son sus límites, los flujos de entrada y salida, sus componentes abióticos y las interrelaciones o interacciones que existen entre los

diferentes componentes (2, 3, 4, 7, 10, 11, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 20, 21).

En la Figura 1.2 se observan algunos detalles de los componentes y las características intrínsecas de los ecosistemas naturales. Se presenta un ecosistema forestal, natural, donde los componentes bióticos más importantes son los árboles y los animales; se observa, además, que existen otros componentes tales como los climáticos, fisiológicos, geológicos y edafológicos que se discutirán en detalle (2, 3, 4, 7, 12, 16, 18).

1.2.1 Límites

Los límites de un ecosistema natural son difíciles de establecer, habitualmente ellos dependen específicamente del tipo de estudio que quiera hacer el investigador en un momento determinado. Los límites superior e inferior del ecosistema generalmente son fáciles de reconocer; el límite superior ha sido fijado por casi todos los investigadores en la superficie de la corona de los árboles que forman parte del ecosistema. El límite inferior generalmente se ha fijado en una cierta profundidad del suelo donde las plantas, que han establecido un sistema radicular para absorber el agua y los elementos nutritivos, ya no tienen ninguna relación con los componentes abióticos. También puede establecerse este límite a la profundidad donde generalmente pasa el agua freática.

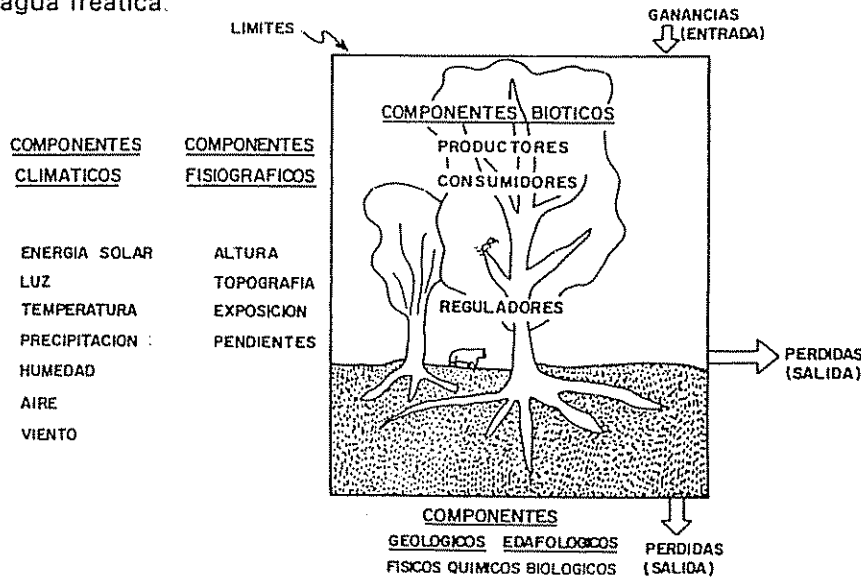


Figura 1.2. El ecosistema natural y sus componentes (según Fassbender, 4).

Los límites laterales del ecosistema, son difíciles de definir, a no ser que haya un rasgo ambiental determinado, tal como un río, una altura, una zona, donde por alguna circunstancia climática, ya no existan plantas, u otros. Por otro lado, también puede ser definido por los investigadores, como por ejemplo, en el caso de una parcela experimental por estudiar (3, 4, 10, 12, 16, 18, 19, 20, 21).

1.2.2 Entradas y salidas

Las entradas o ganancias en el ecosistema son los aportes físicos, químicos y biológicos que contribuyen al mismo, la radiación solar, la precipitación o el calor son ejemplos de ofertas contínuas de alguna sustancia o materia al ecosistema; los animales migratorios, el agua de inundaciones y la fertilización son también fuentes de ganancia del ecosistema, pero de carácter temporal.

Las salidas o pérdidas del ecosistema son los productos o desechos o partes del ecosistema que desaparecen del mismo, por cualquier vía o razón. La energía térmica que se disipa de los componentes bióticos es una forma de pérdida muy importante. Los animales que emigran a otros sitios, el agua que se pierde por escorrentía superficial o por lixiviación, son otras fuentes de pérdidas del ecosistema. Si el ecosistema es explotado parcialmente extrayendo, por ejemplo, la madera, plantas, animales o cualquier otro material, éstas son pérdidas desde el punto de vista del ecosistema, pero al mismo tiempo constituyen productos para el uso humano.

1.2.3 Componentes abióticos

Dentro de los componentes abióticos del ecosistema hay que considerar los componentes climáticos, fisiográficos, edafológicos y geológicos

Los componentes climáticos (Figura 1.2) son la energía solar (luz y temperatura), el aire (oxígeno y anhídrido carbónico), el agua (lluvia, humedad relativa) y los vientos (3, 4, 7, 12, 16, 18, 19, 20, 21)

La energía del sol constituye la fuente lumínica básica para la fotosíntesis, mientras que su forma térmica es la principal fuente de calor de los ecosistemas. Al hacer mediciones de la energía lumínica,

interesa determinar su calidad, vale decir el ámbito de longitudes de onda de la misma, así como la cantidad y duración de la iluminación. En función de esto, se tienen características bastante definidas sobre la cantidad de energía lumínica disponible para el ecosistema.

Para describir el estado térmico del ecosistema, se determina generalmente la temperatura promedio del lugar, interesando además las temperaturas diarias, mensuales y anuales que caracterizan al mismo. Al mismo tiempo, interesan, además de éstas, las temperaturas promedios máximas y mínimas que se registran en el transcurso de un día, un mes y un año. Asimismo, son útiles las temperaturas extremas mínimas que se registran en el sitio, ya que dan lugar a ciertos fenómenos importantes, por ejemplo, condensación de nubes, formación de granizo o días de helada. Las temperaturas máximas indican casos extremos en los cuales se puede producir la desnaturalización de las proteínas, causando una serie de problemas en las células vegetales.

La precipitación es el agua que ingresa al ecosistema en varias formas, como lluvia, nieve o granizo. Aquí es importante conocer la cantidad, su distribución diaria, anual y mensual, su forma líquida o sólida. El agua es de capital importancia al estudiar al ecosistema y en función de eso se ha dedicado un capítulo específico de este libro al ciclo del agua en los ecosistemas. La humedad del aire es el contenido de vapor de agua del mismo, y constituye la forma gaseosa del agua que se encuentra en el ecosistema; en este caso es conveniente medir la humedad absoluta o relativa en el ecosistema en el transcurso del día, registrando además los valores diarios, mensuales y anuales.

Los vientos son importantes para el intercambio gaseoso entre las plantas y el medio ambiente, regulando la transpiración de las plantas y la humedad relativa del aire. Los gases, como el nitrógeno, oxígeno y anhídrido carbónico, que componen el aire son importantes para los componentes bióticos, especialmente para las plantas productoras que utilizan el anhídrido carbónico en la fotosíntesis. En muchos casos es importante conocer el contenido de oxígeno, nitrógeno y de otras sustancias químicas contaminantes del aire, ya que pueden producir un impacto deteriorante en el ecosistema.

Los componentes fisiográficos son: la topografía del terreno, su elevación o altura, la pendiente y la exposición del terreno. Los mismos tienen gran influencia sobre los componentes climáticos, así la altura sobre el nivel del mar, es de gran importancia, porque regula directamente las cantidades de luz, y de lluvia que van a llegar al ecosistema, así como su temperatura. Existe una relación directa entre

la altura y la temperatura, fundada en que la temperatura disminuye 6°C por cada kilómetro de altura; de este fenómeno resultan los pisos altitudinales de los diferentes ecosistemas.

La relación entre los componentes climáticos y los componentes fisiográficos, generalmente se estudian en climatología o en meteorología, pero algunos aspectos se considerarán en esta obra.

Los componentes edáficos se refieren a las características químicas, físicas y biológicas del suelo (Figura 1.2); en el transcurso de la obra se verán algunas características físicas del suelo, especialmente en relación con el ciclo del agua en el suelo; además, se verán algunos aspectos de granulometría y retención de agua en el suelo y en función del enfoque, se verán muchos detalles de los aspectos químicos del suelo, como por ejemplo, contenido y características de la materia orgánica, el contenido y las formas disponibles y no disponibles de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio y otros elementos nutritivos. Se verán también aspectos de materiales primarios y secundarios, del pH del suelo y de las características del aluminio. Los aspectos biológicos se refieren a los organismos (microorganismos y macroorganismos) que viven en el suelo y que participan de todos los procesos de transformación que se producen en él.

Los componentes geológicos interesan como material parental del suelo (Figura 1.2).

1.2.4 Componentes bióticos

Los componentes bióticos incluyen todos los organismos vivos que participan en el ecosistema; existen diferentes puntos de vista y diferentes formas de clasificación de los componentes bióticos (3, 4, 7, 8, 12, 13, 16, 17).

Los componentes autótrofos o productores, se caracterizan porque pueden aprovechar la energía primaria disponible para producir las sustancias orgánicas complejas que las forman. Dentro de este grupo se encuentran las plantas fotosintetizadoras que utilizan el agua del suelo, el CO₂ del aire, y la energía lumínica para producir carbohidratos, los que después pueden ser transformados en una serie de sustancias orgánicas complejas, ricas en energía. Los componentes autótrofos quimiosintetizadores obtienen la energía por alguna vía química, especialmente reduciendo algunas sustancias o sales del azufre. Estos organismos se denominan productores porque producen nuevas sustancias, y en este grupo se encuentran entonces, las plantas verdes.

El grupo de los organismos heterótrofos se caracteriza porque sus integrantes no son capaces de utilizar las fuentes de energía primaria, debiendo recurrir a la materia orgánica producida por los organismos productores; estos seres heterótrofos son muy heterogéneos y configuran una serie de grupos de organismos tales como algunos vegetales (hongos) y todos los animales, incluyendo a los insectos. A estos organismos se les llama también consumidores porque consumen a los organismos productores o sus partes. Se acostumbra dividirlos en dos grandes grupos: los macroconsumidores, que son aquellos como las plantas parásitas, ciertos hongos y los animales que se alimentan de otros organismos, y los microconsumidores, que son los grupos de bacterias de hongos que intervienen en los procesos de descomposición de la materia orgánica. A este último grupo se le llama también descomponedores o detritófagos, ya que transforman enteramente los desechos que han producido los otros organismos. Su papel es muy importante en la regulación de los ciclos internos de los ecosistemas.

1.2.5 Interrelaciones bióticas

En todos los ecosistemas, las plantas o los animales no se presentan aislados, sino que, junto con los organismos de su misma especie, forman una población. El conjunto de poblaciones que integra un ecosistema se denomina comunidad. Cuando se quiere hablar de una comunidad de plantas, se usa el término de comunidad vegetal, mientras que si se trata de poblaciones de animales, entonces se habla de comunidad animal (7, 15).

Tanto la población como la comunidad, son el resultado de la evolución de la naturaleza en un sitio dado, y su aparición expresa, más que todo, el ámbito de tolerancia que tienen las especies. Cada especie es afectada o regulada por el medio ambiente y en función de eso, siempre existe algún factor limitante, para una determinada especie; estos factores limitantes pueden ser abióticos, por ejemplo la luz, la temperatura, el agua o elementos nutritivos o bióticos, como las malas hierbas o los hongos, las bacterias o los virus y en muchos casos la acción limitante es conjunta.

Cada población ocupa un espacio en el territorio de la comunidad, ya sea en la superficie del suelo o en algún lugar, dentro o sobre las plantas, o en el suelo, ocupando así una determinada área o volumen. De esta ocupación resulta una densidad de población, cuya regulación depende de la natalidad y mortalidad de los individuos de una determinada población. Cada población tiene una determinada

capacidad de crecimiento y en condiciones favorables, se alcanza un desarrollo exuberante de la misma, logrando su potencial biológico máximo, dentro de una comunidad.

En las comunidades y poblaciones se establecen relaciones o interrelaciones intraespecíficas o interespecíficas que son de especial importancia para describir al ecosistema. En el mismo, se establece una relación alimentaria entre los organismos que lo integran y así se estructura una cadena alimentaria, entre los organismos autótrofos y los consumidores; en esta forma la energía y la materia van pasando de un componente a otro, como en una sucesión de eslabones. Por ejemplo, una determinada especie vegetal puede ser aprovechada como alimento por insectos; estos insectos pueden ser utilizados como alimento por ciertos pájaros, los pájaros por su parte pueden ser base alimentaria de culebras y las culebras pueden ser comidas por el gavilán (7).

Cada individuo de una determinada población tiene una fuente específica alimentaria y ocupa lo que se llama un nivel trófico; en función de ello, se definen distintos niveles tróficos tales como: herbívoros, carnívoros, descomponedores, etc., en los que los integrantes de un cierto nivel trófico tienen, una misma fuente alimentaria. Con base en los niveles tróficos, se elaboran las llamadas pirámides ecológicas. Una pirámide ecológica implica que de un piso o nivel trófico a otro, se reutiliza la materia y se reutiliza la energía, aunque generalmente se producen pérdidas muy notables de esta última. Existen pirámides ecológicas de biomasa y pirámides ecológicas de energía; como ejemplo se puede indicar que en una hectárea de terreno pueden contarse un millón de cepas de los individuos forrajeros, éstos son la fuente alimentaria de dos o tres cabezas de ganado y estas cabezas de ganado constituyen la necesidad de carne de un hombre, por año; este simple ejemplo muestra que la pirámide es muy aguda, dada la disminución de la cantidad de biomasa y de energía, que pasa de un nivel a otro.

Se ha mencionado ya, que en cada eslabón de la cadena alimentaria se pierde energía, lo que ha llevado a calcular la eficiencia ecológica de los diferentes eslabones en estas secuencias. Las plantas, que son los organismos productores, sólo utilizan del 1 al 2% de la energía solar disponible, por lo tanto ellas tienen una eficiencia ecológica bastante pequeña; otros organismos consumidores tienen una eficiencia ecológica mayor; así, por ejemplo, el ganado vacuno tiene una eficiencia ecológica del 5 al 7% en función de la materia verde que se le ofrece; las arañas tienen una eficiencia del 20% y se ha comprobado que, cuanto más pequeños sean los insectos o los organismos hasta el nivel de las bacterias, mayor es su eficiencia ecológica (7).

Los flujos de energía y de materia dependen de la relación entre los individuos de una misma población y de diferentes poblaciones dentro de la comunidad, (4, 7, 12, 16). Un organismo puede establecer con otros organismos tres tipos básicos de relaciones: neutral, positiva (sinérgica) o negativa (antagónica); estas interrelaciones reciben diferentes denominaciones, en función de los beneficios o perjuicios que causan a los participantes. Se habla de relaciones neutrales cuando no hay beneficios ni perjuicios de los organismos relacionados, así por ejemplo, un hongo y un árbol, viviendo sobre el suelo no tienen ninguna influencia y su relación es neutral (7).

En la comensalia, hay beneficios para una de las partes, pero la otra no es afectada; por ejemplo, una orquídea que se establece en un árbol es autosuficiente, por lo que se sirve del árbol como soporte, pero no lo daña. El mutualismo indica que ambas partes se benefician de la relación, un caso típico es la simbiosis de fijación del nitrógeno entre bacterias y plantas leguminosas, donde cada una de las partes se beneficia de su relación con la otra.

En el parasitismo, una parte se beneficia y la otra se perjudica; los parásitos generalmente son pequeños, mientras que los organismos hospedantes generalmente son más grandes; un ejemplo de esta relación, es la de la garrapata con la vaca; o entre plantas, las plantas parásitas o epífitas que viven en los árboles grandes. En general, un hospedante soporta a un número elevado de parásitos.

La depredación se caracteriza porque una parte se beneficia y la otra se perjudica; el depredador es generalmente grande y la presa es pequeña; por ejemplo una araña que se come a un insecto. Una forma especial de depredación, es el pastoreo, donde los animales comen el forraje. El ramoneo, forma especial de pastoreo, donde los animales comen parte de los árboles, es también una forma de depredación.

La alelopatía es otra forma de interacción, en que una planta puede inhibir la germinación o el crecimiento de otras, mediante la liberación de productos químicos tóxicos para ellos; algunos ejemplos son el jaúl (*Alnus* spp.), ciprés (*Cupressus* spp.), o el madero negro (*Gliricidia* spp.) que tienen características alelopáticas muy importantes (7).

Las interrelaciones más importantes, entre las especies del ecosistema, son sin duda, las de competencia. Las plantas que crecen sobre el suelo, aprovechan el agua y los elementos nutritivos en forma competitiva, utilizando también la luz, la humedad del aire, etc, en forma antagónica.

1.2.6 Interrelaciones abióticas

Las interrelaciones, dentro de un ecosistema, no son solo de carácter biótico, también pueden ser de carácter abiótico; considerándose aquí al flujo de energía, el ciclaje de la materia orgánica y de los elementos nutritivos, la descomposición de los residuos vegetales, etc., todos ellos muy importantes desde el punto de vista del funcionamiento de los ecosistemas (2, 3, 4, 7, 10, 11, 12, 16, 17, 18, 19, 20, 21).

El enfoque básico de las ciencias edafológicas aplicadas a los ecosistemas naturales -así como también a otros sistemas de producción netamente agrícolas, pecuarios, forestales o agroforestales se basa en el estudio y aplicación de los conocimientos de las interrelaciones, no biológicas, dentro de los sistemas. El suelo aporta, en función de su profundidad, el sostén para las plantas y participa directamente en los ciclos del agua y elementos químicos que se desarrollan en la biosfera (4). Un análisis de los ciclos implica una descripción estática (inventario de los recursos en compartimentos) y una medida dinámica (descripción de los procesos de flujo entre compartimentos). El agua juega un papel muy importante dentro de todos los procesos y por ello necesita una descripción especial. El ciclo de la materia orgánica es el resultado de los procesos biológicos del sistema de producción y de descomposición, conllevando la acumulación y transferencia de los elementos químicos. Las medidas de manejo del sistema (fertilización, encalado, etc.) y las cosechas representan exportaciones del sistema que deben estudiarse en detalle. Con base en todos estos aspectos pueden desarrollarse los modelos de los ecosistemas.

1.3 Los recursos naturales

En los acápites anteriores se ha podido ver cómo en la naturaleza existen interacciones muy notables, entre los organismos y el medio ambiente. Al hablar de recursos, se concentran las ideas en la utilización de un número grande de factores bióticos o abióticos de los ecosistemas por el hombre; entonces se tiene así un concepto antropocéntrico de los ecosistemas.

De acuerdo con Fournier (7) los recursos naturales se pueden dividir en diferentes grupos. Las dos categorías más importantes son los recursos naturales renovables y los recursos no renovables. Los recursos renovables son aquellos que en función de las características de los ecosistemas de reproducción, son susceptibles de perpetuarse en

su disponibilidad; como ejemplos se indican el agua, los animales y las plantas que utiliza el hombre. En el caso de los recursos no renovables, tienen la característica de que según se van utilizando, se van agotando y su disponibilidad disminuye, y no puede ser regenerada; aquí se tendrían como ejemplo, todos los tipos de yacimientos que se encuentran en la naturaleza y así se puede indicar la mayor parte de las fuentes de energía que se utilizan, como el petróleo, el gas o todos los yacimientos minerales.

De acuerdo con el mismo autor (Fournier, 7) existen diversos criterios para clasificar los recursos naturales; diferenciándose cinco categorías muy importantes; los recursos alimentarios, los recursos energéticos, los recursos de protección, los recursos de recreación y esparcimiento y por último, los recursos culturales y estéticos. Los recursos alimentarios son de uso directo para la alimentación del ser humano y pueden ser de origen vegetal, animal o mineral. Dentro de los vegetales, se utilizan entre otros los granos, las verduras, las hortalizas y las oleaginosas; existen diferentes plantas para la preparación de bebidas y estimulantes, así como especies, condimentos y frutales. Dentro de los recursos animales se tiene la utilización de la carne del ganado vacuno, caprino, porcino y ovino, también de aves, peces, mariscos y otras especies, que son utilizadas también para la alimentación. Dentro de los recursos alimentarios minerales se tiene el agua, la sal y otros minerales que utiliza el hombre.

Los recursos energéticos pueden ser de carácter nuclear, animal, vegetal, eólico, hidráulico, geotérmico, mineral y fósil.

Los recursos de protección los utiliza el hombre para la construcción de casas, de edificios y también para su propia vestimenta, pueden ser de carácter vegetal, animal, y mineral; dentro del grupo vegetal se tiene la utilización de las maderas, fibras, plantas vivas; los productos animales son los cueros, plumas, el pelo. De gran importancia son los recursos minerales, como metales, calizas, arcillas, piedras, arenas, que se utilizan especialmente para fines de construcción.

Los recursos de recreación y esparcimiento, así como los recursos estéticos son de otro carácter completamente diferente ya que su efecto se asocia a la salud, el bienestar físico, los aspectos emocionales para el ser humano; dentro de estos recursos se tienen las plantas ornamentales, las plantas y las comunidades vegetales de los parques forestales y áreas de recreación. Además, dentro de los paisajes existen algunas formas que agradan al ser humano, los volcanes, las playas, los lagos y en función de eso son recursos de

recreación para el bienestar del ser humano. Los recursos culturales y estéticos afectan así los sentimientos del ser humano y le ayudan a sentirse bien.

Existen interacciones múltiples entre los ecosistemas naturales y los diferentes tipos de recursos, así por ejemplo el ecosistema natural explotado puede ser fuente alimentaria, energética, fuente de protección y también al mismo tiempo puede ser una fuente de recreación y esparcimiento y por ello puede ser también un recurso cultural y estético.

1.4 Los ecosistemas artificiales o agroecosistemas

Los ecosistemas artificiales como su nombre lo indica, son sistemas en los cuales, por alguna circunstancia, se alteran las condiciones naturales; estos sistemas son generalmente antropocéntricos, dirigidos, orientados y manipulados por el ser humano, quien ha determinado los componentes bióticos o alterado también los componentes abióticos para tratar de optimizar las cosechas y los rendimientos, usando así, directamente los productos de los ecosistemas. El término sistemas de producción agrícola, se refiere generalmente a los agroecosistemas (4, 7, 12, 13, 15).

Existe una serie de características intrínsecas de los agroecosistemas. Las posibilidades de alteración de las condiciones naturales son múltiples. Los componentes abióticos solamente se pueden manipular en cierta forma y hasta un cierto grado. Los componentes climáticos discutidos en el capítulo anterior, como la irradiación, la humedad relativa del aire, el viento y los gases son prácticamente inalterables; sin embargo existen posibilidades pequeñas de regulación de la precipitación (formación de nubes con yoduro de potasio) o también, a través de cortinas rompevientos, se puede manipular un poco el viento.

Las características intrínsecas del suelo, o sea, sus características físicas, químicas y biológicas, son alterables hasta cierto grado, en función del laboreo del suelo, uso de fertilizantes, aplicación de materiales de enmienda y prácticas de conservación y manejo del suelo. Sin embargo, las características más importantes de los suelos como la textura, la estructura, el contenido de elementos químicos primarios y secundarios, se mantienen inalterados.

Existe una serie de suministros secundarios que pueden ser orientados y dirigidos por el hombre, empezando por su propio trabajo. Con la aplicación de diferentes insumos (mano de obra, materiales,

máquinas, equipos, alimentación externa, capital) se pueden alterar notablemente las condiciones de los agroecosistemas. Las decisiones de regulación dentro de los agroecosistemas están más que todo orientadas hacia la decisión sobre el cultivo por utilizar, sus prácticas agronómicas, la utilización de pesticidas, etc. A través de la fitogenética se pueden obtener plantas o variedades más productivas, además se puede manejar su fenología y fisiología obteniendo mejores cosechas. Con el procesado de los productos de los ecosistemas artificiales o agroecosistemas se obtienen ventajas muy importantes. En los agroecosistemas se observa, sin embargo, una gran cantidad de restricciones externas, como las enfermedades, las plagas y las malas hierbas, etc.

En función del producto por utilizarse o la orientación que tenga un agroecosistema, entonces se tienen las diferentes áreas agropecuarias de producción, como la agricultura, la ganadería y la silvicultura. También hay otras áreas importantes, o sectores de agroecosistemas de producción especializada, como la pesquería, la acuicultura y la maricultura (7).

1.5 La necesidad de la conservación de los recursos naturales y los ecosistemas

El menoscabo de los recursos naturales y la degradación de los ecosistemas naturales, son dos de los procesos más serios que afectan al desarrollo rural en las áreas tropicales y subtropicales. Por ello, en las últimas décadas, ha aumentado la inquietud por controlar esas pérdidas, con base en prácticas de conservación y manejo de los recursos.

Los bosques húmedos tropicales cubrían inicialmente 16,000 km². Actualmente cubren aproximadamente 12,000 km², de los cuales un 56,5% están localizados en América; por tanto, este continente tiene, una cobertura boscosa del 40,4%. Las de Asia y Africa son de 32,3 y 9,9% respectivamente. Los procesos y alcances de la deforestación han sido cuantificados continuamente por FAO (1); la tasa de deforestación actual es de 17 a 20 millones de hectáreas por año; por lo que aumentó notablemente, comparada con 10 a 11 millones de hectáreas, en 1980. Esas pérdidas se deben, especialmente a la necesidad de madera comercial y de leña y a la transformación de los bosques en áreas de producción agrícola y ganadera. La disminución de los bosques se localiza especialmente, en América con 57%, del total y corresponde un 25% al Asia y 18% a Africa (1, 5).

Los ecosistemas de los bosques húmedos tropicales han evolucionado como los ecosistemas más ricos de la tierra en flora y fauna. Ellos abrigan prácticamente un 50 por ciento de todas las especies (20 000 vertebrados, 400 000 insectos, 45 000 plantas y 3000 especies forestales). La biodiversidad de los ecosistemas tropicales disminuye igualmente en forma paralela, a la deforestación.

Otras consecuencias directas de la deforestación son el aumento de escorrentía del agua, la erosión del suelo y especialmente los cambios globales climáticos (14). La erosión del suelo, con el agua o el viento, implican la pérdida de la capa húmica, rica en elementos nutritivos (1, 5)

El manejo inadecuado de los recursos naturales, especialmente del suelo, conlleva a una gran pérdida de elementos nutritivos. Así, por ejemplo, en la agricultura migratoria, o de "tala y quema", se pierden cantidades notables de carbono y nitrógeno presentes en la biomasa de los bosques, al ser quemados. Se considera que, anualmente, entre 1 y 3 billones de toneladas de CO₂ se pierden por la deforestación y las quemas. El aumento de CO₂ en la atmósfera (5 a 6 billones de toneladas) sin embargo, proviene especialmente, de la quema de residuos fósiles para obtener energía (14).

El aumento de CO₂ y de metano en la atmósfera; la polución con complejos fluorhídricos y la disminución de la capa de ozono en la estratosfera, producen un cambio gradual, global, de la temperatura, el cual afecta los balances hídricos y energéticos de toda la tierra (1, 14).

Otros problemas relacionados con la pérdida de los recursos naturales son:

- la desertificación y aumento de áreas áridas en los subtropicos,
- la contaminación ambiental, especialmente del suelo, agua y atmósfera, con pesticidas, elementos pesados y otras sustancias químicas,
- los cambios en la cantidad y calidad del agua freática (salinización) y al menoscabo de su uso doméstico.
- sobreexplotación de los ecosistemas marinos y ribereños
- las inundaciones y el acarreo de sedimentos en las represas

No hay duda que los problemas mencionados anteriormente están directamente relacionados con el aumento de la población; en muchos países en desarrollo, la tasa anual del aumento de la población es del 3 - 4 %, por lo que duplican su población en 20 a 30 años. En forma paralela, aumentan las áreas urbanas necesarias, para el desarrollo comercial e industrial, así como otras infraestructuras (carreteras, represas, etc.). Para asegurar las necesidades básicas de la población mundial creciente es necesario aumentar la productividad agropecuaria en forma paralela, entre 3 - 4 % (5). Esto es factible con base en sistemas de producción agrícolas y pecuarios, mejorados y sostenibles. Por otro lado, será igualmente factible, la conservación de los recursos y ecosistemas naturales.

1.6 El modelaje de los ecosistemas

1.6.1 Técnicas de modelaje

Los sistemas, en su concepto más general, se pueden definir como un arreglo de componentes relacionados, de tal modo, que funcionan como una unidad o un todo; éstos tienen como rasgos comunes los siguientes elementos: entradas, salidas, límites, componentes e interrelaciones entre estos componentes (2, 3, 4, 10, 11, 12, 16, 17, 18, 19, 20, 21).

La naturaleza está ordenada en una jerarquía de sistemas, de complejidad creciente, desde el nivel atómico hasta la biosfera; entre éstos, los sistemas ecológicos (ecosistemas) son aquellos conformados por componentes vivos y no vivos que interactúan entre sí (Figura 1.2). En estos sistemas ingresa energía de origen solar y materiales provenientes de otros sistemas. Esta energía solar se transforma en energía térmica, que se disipa en el espacio y en energía que se almacena en forma potencial.

La energía potencial, almacenada, puede ser aprovechada por el hombre, siendo su máxima utilización el propósito básico o primario de los sistemas de producción agrícolas, pecuarios y agroforestales.

El manejo y el eventual mejoramiento de los componentes agrícolas se basa en una comprensión adecuada de su estructura y funcionamiento; esta tarea es compleja en extremo, dada la cantidad de aspectos que deben considerarse simultáneamente.

Para facilitar la tarea, a menudo, se recurre a la metodología del análisis de sistemas, que tiene la virtud de poder representar fenómenos

complicados en términos relativamente simples, que esquematizan los aspectos importantes y básicos de la situación bajo análisis.

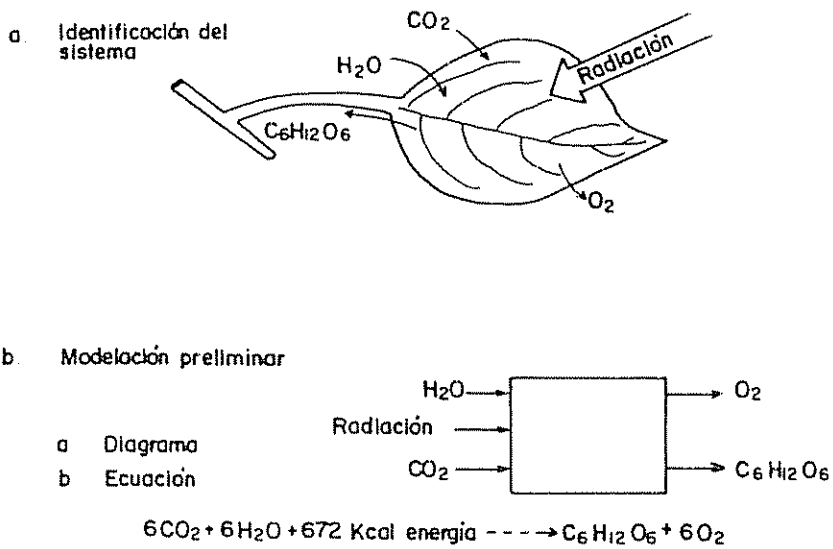
Los ecosistemas, o parte de ellos, pueden ser descritos mediante modelos, que constituyen una representación simplificada de la realidad. En los modelos, se exaltan los aspectos más sobresalientes del sistema, de acuerdo con el objeto de este lenguaje (2, 3, 4, 12, 16, 18, 19, 20, 21).

El "modelo matemático" es aquel en el que los flujos están representados por ecuaciones que permiten predecir la magnitud de los componentes, en un tiempo dado.

La técnica de modelación tiene una secuencia de etapas precisas, que comienza con la "identificación del sistema"; en ésta se establecen claramente los componentes y procesos involucrados, cuya importancia amerita su inclusión en el modelo. Sobre esta base en la segunda etapa se "formulará el modelo", el cual podrá adoptar la forma de diagrama de flujo. La tercera etapa consiste en la toma de mediciones de cada componente, lo cual permitirá elaborar un modelo cuantitativo y posteriormente, uno matemático. La última etapa de "validación del modelo", consiste en comparar los valores del sistema real, con los predichos por el modelo matemático y realizar, si fuese necesario, los ajustes a las ecuaciones propuestas. La Figura 1.3 muestra esta secuencia a partir del modelo ya formulado (12). Utilizando técnicas de simulación, es factible proyectar los resultados obtenidos con un modelo en el tiempo y espacio, bajo condiciones definidas (19, 20, 21, 22).

Las técnicas de modelación son aplicables a cualquier nivel de organización: a nivel celular, como el proceso de fotosíntesis (Figura 1.3), a nivel de fincas, regiones (Figura 1.4) y a nivel de los procesos que ocurren en el suelo (Figuras 1.5, 1.6, 1.7).

Las técnicas de modelación constituyen una valiosa herramienta en la investigación de sistemas, dado que permiten formular las relaciones entre los componentes de un modo inequívoco, tal como fue interpretado por el investigador; destacan los aspectos sobresalientes y permiten identificar aquellos que son suficientemente conocidos, de otros con deficiencias de conocimiento. Fenómenos adecuadamente medidos, pero cuyo proceso íntimo no es suficientemente conocido, pueden ser presentados mediante el modelo de la caja negra (Figura 1.3.b) hasta que posteriores investigaciones dilucidan el proceso (Figura 1.3.c).



c. Validación y modificación del modelo

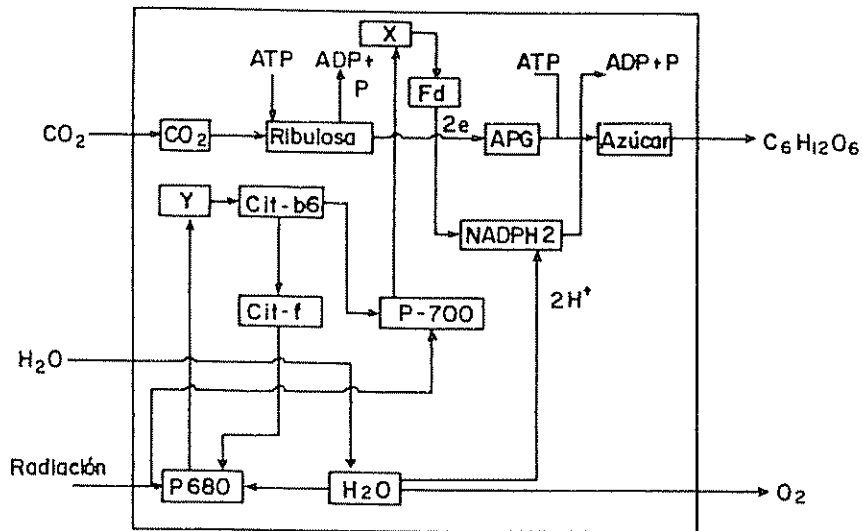


Figura 1.3. Secuencia en un modelo del proceso de fotosíntesis (adaptado y resumido de Wilson y Loomis, 1968. Tomado de Hart, 12).

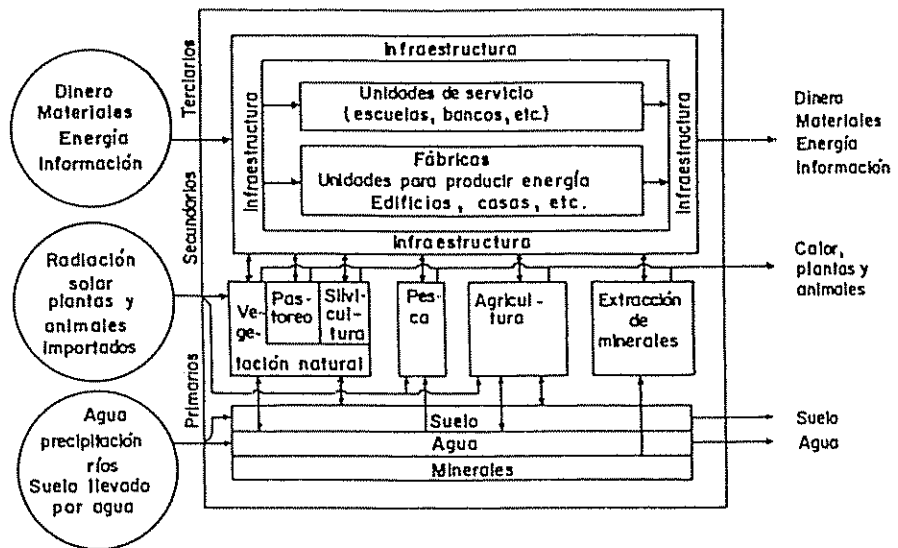
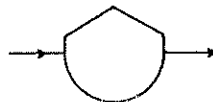


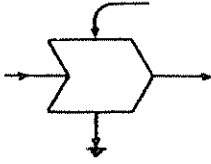
Figura 1.4. Una región es como un sistema que incluye componentes físicos, bióticos y socio-económicos que interactúan formando procesos primarios (silvicultura, agricultura, etc.), secundarios (industria, construcción, etc.), y terciarios (escuelas, bancos, etc.), (según Hart, 12).

1.6.2 Simbología de los diagramas de flujo

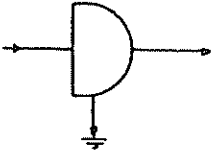
Odum (16, 18) introdujo una simbología útil para la elaboración de los diagramas de flujo, en la cual, la función de cada componente del sistema, es representada por un símbolo diferente. Los símbolos más comúnmente utilizados son los siguientes (16, 18):



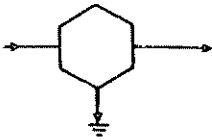
a. Almacenaje pasivo. Este símbolo representa el almacenaje de cualquier substancia en el ecosistema, sin que ocurra una transformación de energía durante el almacenaje. Algunos ejemplos son el almacenaje de hojas en el suelo del bosque, gasolina en el tanque de un automóvil o comida en la alacena.



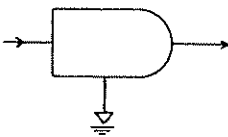
b. Multiplicador. Este símbolo denota la relación multiplicadora entre un flujo energético, de baja magnitud (factor controlante) y otro flujo energético de mayor magnitud (insumo). El producto representa un tercer flujo energético y está acompañado por la pérdida de calor.



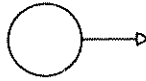
c. Receptor de energía. Este símbolo representa la recepción de energía ondular, como la energía solar, el sonido y el oleaje. La energía ondular activa algún material cíclico en el sistema y éste transfiere energía potencial a algún proceso del sistema y retorna a su estado de receptor. Un ejemplo es la recepción de luz por la clorofila.



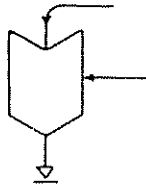
d. Consumidor. Este símbolo representa cualquier población de consumidores, en un sistema; por ejemplo, el ser humano, sus máquinas, o los animales del bosque. El sistema consumidor almacena energía potencial activamente (por medio de transformación y pérdida de calor) y utiliza parte del almacenaje para trabajar y obtener más energía potencial.



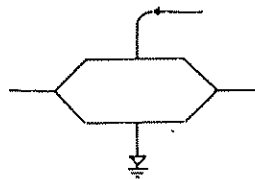
e. Productor. El símbolo de un sistema productor es la combinación de dos símbolos: un receptor de energía y un consumidor. La respiración del sistema es el consumidor, el cual tiene la maquinaria metabólica y recibe energía potencial del receptor. Ejemplos: un bosque o una planta.



f. Fuente de energía. Cualquier fuente de energía en un sistema se representa con el círculo. Ejemplos: el sol, la energía fósil, el agua en una represa o el viento. Para facilitar la comprensión se debe especificar si la energía es transmitida como un flujo continuo, con fuerza continua o con alguna periodicidad específica.

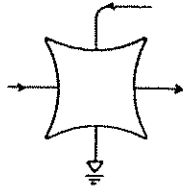


g. Presión o tensión. Este símbolo denota la pérdida de energía potencial de un sistema. La pérdida es una función multiplicativa de algún factor de tensión o presión. El producto de la interacción no hace el trabajo, sino que se pierde como calor. Ejemplo: el efecto de un contaminante en un río.

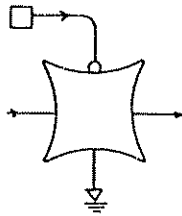


h. Multiplicador de dos direcciones. Este símbolo también se denomina símbolo de difusión. Se utiliza para representar procesos que pueden mover materia o energía en dos direcciones. La fuerza motriz del proceso determina la dirección del flujo. Ejemplos: el movimiento de las mareas bajo la acción de la luna; el movimiento de sustancias químicas bajo la influencia de mareas; el movimiento vertical del plancton y nutrientes en el mar, o el intercambio de gases entre cuerpos de agua y la atmósfera.

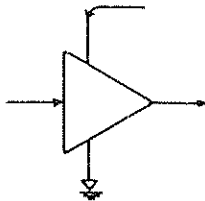
i. Interruptor. Este símbolo denota procesos que tienen estados activados y no activados. El flujo no es posible



en ausencia de la señal de activación. Cuando esta señal está presente, el interruptor se activa y es posible el flujo de materia o energía. Ejemplos de la aplicación de este símbolo: el interruptor eléctrico o la germinación de una semilla.



j. Interruptor activado por un límite. Este símbolo se utiliza de la misma manera que el interruptor anterior, pero antes de ser activado, el factor activador tiene que exceder un límite crítico, característico, del proceso que se está modelando. Por ejemplo, el flujo de agua sobre una represa tiene que exceder el volumen de la represa antes de que ocurra. Del mismo modo, el agua no se escapa del suelo, hasta que no se exceda su capacidad de retención. Al utilizar este símbolo hay que indicar las condiciones que se deben satisfacer, para que funcione el interruptor.



m. Amplificador con ganancia constante. Este símbolo describe sistemas con energía ilimitada, que se utiliza para aumentar el insumo por un factor constante (el factor de amplificación). Esto causa crecimiento exponencial. Una población que tenga una fuente de alimentos y espacio ilimitado puede sostener una razón de reproducción constante y crecimiento exponencial.

n. Pérdida de calor y flujos en estado estable. Se utilizan dos símbolos: la línea representa el



flujo estable de energía; y la fecha, con el símbolo de tierra que se utiliza en electricidad, representa la pérdida de calor necesaria para hacer posible cualquier proceso irreversible (unidireccional).

En la Figura 1.5. se presenta, como ejemplo, un ecosistema natural en función de los símbolos propuestos por Odum (16, 17, 18). Las mediciones para describir todos los procesos del ecosistema son complejas y laboriosas. Esto es debido a que existen muy pocos ejemplos completos de la aplicación de esta metodología. En la obra de Odum (16, 18) se hace énfasis en los aspectos energéticos de ecosistemas e inclusive de regiones o áreas de producción. En el libro de Golley (8, 9) se han considerado también algunos resultados y ejemplos.

1.6.3. Modelos edafológicos de los ecosistemas

El enfoque de desarrollo de modelos para describir a los ecosistemas naturales, presentado anteriormente, tiene un carácter integral, completo u holístico, siendo por ello complejo. En función de los objetivos de determinadas investigaciones, se pueden enfatizar algunos de los aspectos relevantes de los ecosistemas. La materia orgánica, el agua y los elementos nutritivos son el "capital" de los ecosistemas naturales y el punto de partida para su utilización por el hombre (4). El progreso y provecho de los seres humanos depende en gran parte de la utilización de los recursos naturales renovables y no renovables (Capítulo 2).

En los modelos que se van a considerar en el transcurso de este libro, se hace hincapié en el papel del suelo y de los recursos edafológicos en ecosistemas naturales y artificiales (sistemas de producción agrícola, ganadera, forestal, agroforestal) y por ello se presentarán a continuación dos ejemplos básicos del desarrollo y aplicación de los modelos respectivos:

Modelo de la materia orgánica

La representación esquemática del ecosistema natural y el modelo de la materia orgánica, permiten, delimitar y determinar los componentes del ecosistema, derivando sus procesos de ganancias, pérdidas y transferencias (Figura 1.6, Ver 2, 3, 4, 10, 12).

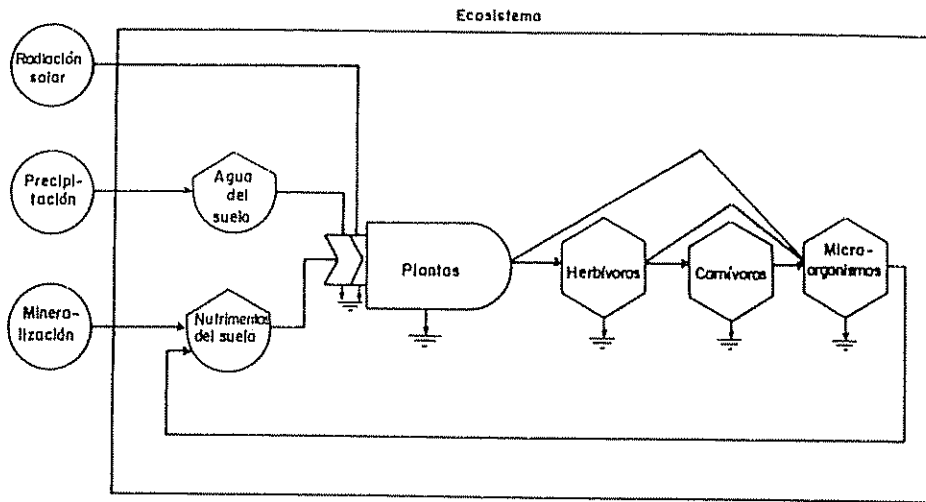


Figura 1.5. Un ecosistema representado como un diagrama de circuitos, usando la simbología de Odum (16, 18).

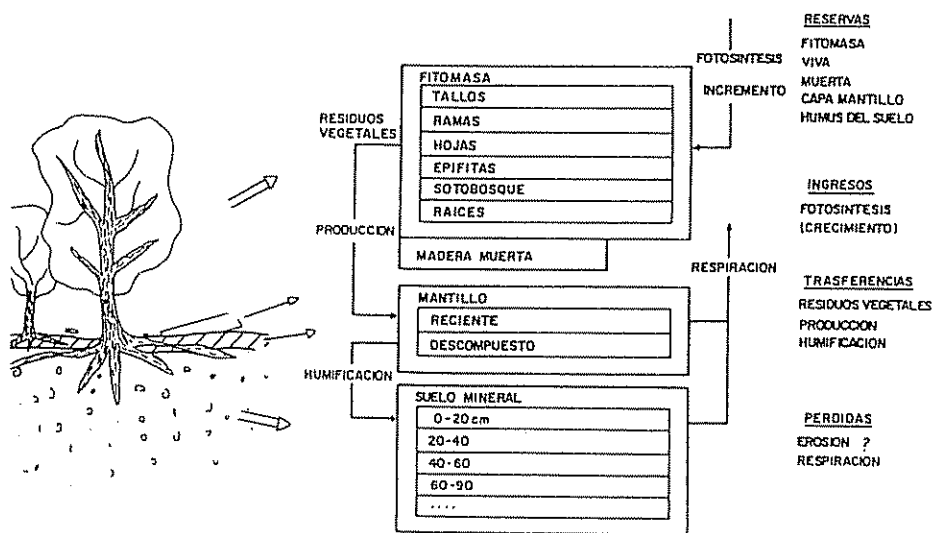


Figura 1.6. Representación esquemática de un ecosistema natural forestal y el modelo de la materia orgánica (según Fassbender, 4).

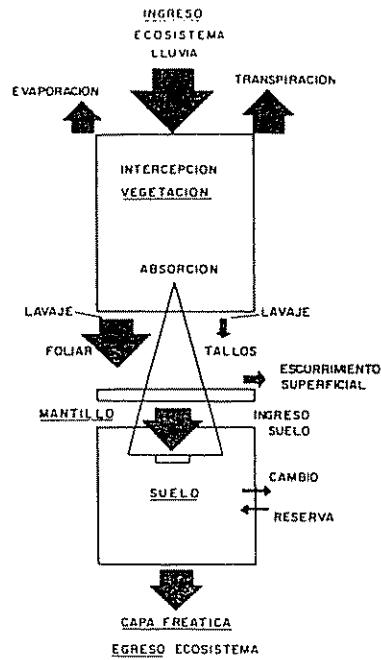


Figura 1.7. Componentes del modelo del agua en un ecosistema natural forestal (según Fassbender y Grimm, 3; Grim y Fassbender, 11).

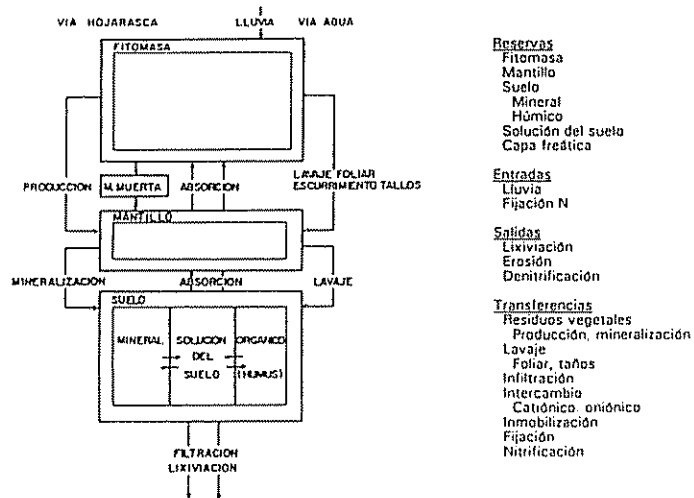


Figura 1.8. Bases del modelo de los elementos químicos en un ecosistema forestal natural (adaptado de Fassbender, 4; ver también 2, 3, 10, 11).

Como resultado de la actividad fotosintética y en función de la sucesión ecológica, se establece en cada lugar, una comunidad vegetal que ha almacenado una determinada reserva orgánica. La fitomasa se distribuye en compartimentos aéreos (hojas, ramas, tallos, frutos, sotobosque, eventualmente madera muerta, en pie) y subterráneos (raíces). En la mayor parte de los ecosistemas, la vegetación se encuentra en su estado clímax, por lo que la producción (incremento) o el anabolismo, es equivalente a la consumición (degradación, respiración) o al catabolismo. La reserva, es así prácticamente constante, siendo los ingresos equivalentes a los egresos, a no ser que se produzca un movimiento lateral de materia (erosión eólica o hídrica).

En la capa de mantillo, se observa una acumulación transitoria de la materia orgánica, los residuos vegetales son descompuestos o humificados pasando al suelo y acumulándose en los horizontes húmicos. En la Figura 1.6 no se ha considerado, por razones de simplificación, a la materia orgánica animal (zoomasa), ni microbiana, aunque los animales y los microorganismos juegan un papel muy importante en los procesos de su transformación (8, 9).

La utilización de este modelo y explicación en detalle de las mediciones por realizarse, para describir a los ecosistemas, se verán en detalle en capítulos subsiguientes (Capítulo 4).

· Modelo del agua

El ciclo del agua en la naturaleza, es complejo (Capítulo 3); como solvente universal inorgánico (elementos nutritivos, formación del suelo) y orgánico (procesos bioquímicos de las plantas y animales) es también de especial importancia en los ecosistemas (Fig. 1.7, ver 4, 10). El agua que ingresa al ecosistema, depende del régimen pluvial de un lugar. Una parte del agua de lluvia es retenida por las hojas de la vegetación (intercepción) y generalmente se evapora, sin llegar al suelo. El resto del agua de lluvia se lava de la superficie de las hojas y de los tallos, llegando a la superficie del suelo; esta agua puede escurrirse sobre la superficie del suelo o infiltrarlo después de pasar la capa de mantillo.

En función de las características del suelo, se pierde parte del agua por filtración a la capa freática, mientras que otra parte se almacena en forma disponible para la vegetación. De esta forma las plantas absorben las cantidades necesarias de agua para sus ciclos energéticos y nutrimentales; una parte se almacena en los tejidos y el resto pasa a la atmósfera en forma de vapor, como agua de transpiración.

Como se verá en el Capítulo 3, el modelaje del agua de ecosistemas es bastante complicado, ya que las mediciones por realizarse son difíciles y costosas; por eso, la información disponible es muy limitada.

Modelos de los elementos nutritivos

Los modelos de los elementos químicos nutritivos esenciales o funcionales y perjudiciales o contaminantes en los ecosistemas (Figura 1.8), son muy complejos y diferentes entre sí, debido a las características intrínsecas de los mismos (límites, componentes, fuentes de ganancia y pérdida de interacciones).

Los componentes abióticos geológicos y edafológicos juegan un papel importante en el modelo, ya que representan la fuente primaria de acumulación de elementos químicos en forma orgánica y mineral. A través de los procesos de meteorización y mineralización por un lado, y de intercambio aniónico y catiónico por el otro, aparecen cantidades pequeñas de elementos nutritivos en la solución del suelo. Así los elementos en sus formas iónicas, se encuentran disponibles y son absorbidos por las plantas. Sin embargo, en esta forma son también objeto de lixiviación y pérdida del sistema.

Las formas de acumulación y las cantidades de las reservas en la biomasa -plantas, animales, microorganismos- difieren notablemente entre elementos químicos ya que cada uno juega un papel fisiológico determinado. Con la producción de residuos vegetales se trasladan cantidades notables de elementos químicos a la capa de mantillo, donde se acumulan temporalmente. En condiciones climáticas tropicales -temperaturas relativamente altas- la velocidad de mineralización de la hojarasca, es rápida. Así se liberan nuevamente los elementos químicos pasando en su forma iónica a la solución del suelo, donde nuevamente están disponibles para las plantas. La fijación de nitrógeno -simbiótica o asimbiótica- es una fuente de ingreso muy específica de este elemento para el ecosistema.

El agua juega un papel decisivo en la transferencia de elementos químicos en los ecosistemas. Con el agua de lluvia ingresan al ecosistema no solo elementos nutritivos (especialmente N y S) sino también contaminantes (elementos pesados). En el lavado foliar y el escurrimiento de tallos generalmente se observa un aumento de las concentraciones de elementos químicos. Así se filtran los elementos en el suelo mineral, donde aparecen en la solución acuosa, siendo nuevamente disponibles para las plantas. Las tasas de lixiviación dependen del balance hídrico y de las concentraciones de los elementos químicos en la solución del suelo.

Los detalles generales y específicos del modelaje de los elementos nutritivos se verán con mucho énfasis en los capítulos correspondientes.

RESUMEN

- Se describe a la biosfera dentro de la naturaleza y se considera su importancia.
- Después de definir al ecosistema, se describen en detalle sus límites, entradas, salidas y componentes bióticos y abióticos. Se hace hincapié en la presentación de las interrelaciones bióticas y abióticas entre los componentes del ecosistema.
- Se discuten detalles de los recursos naturales, enfatizando su clasificación en renovables y no renovables.
- Se definen los agroecosistemas y se discuten aspectos de la conservación de los recursos naturales y los ecosistemas.
- Para describir a los ecosistemas se proponen las técnicas del modelaje. Los modelos son representaciones simplificadas en los sistemas, pero funcionales para lograr un objetivo determinado.
- Se describen las secuencias para el desarrollo de modelos y se comentan los símbolos por utilizar.
- Los modelos edafológicos de ecosistemas se usan para describir especialmente los ciclos de la materia orgánica, del agua y de los elementos nutritivos.
- Se presentan las bases para los modelos en ecosistemas forestales naturales.

LITERATURA

1. FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). 1990. Assessing changes in tropical forest cover. FAO's 1990 assessment. Roma, Italia. s.p.
2. FASSBENDER, H.W.; GRIMM, U. 1981. Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. II. Producción y descomposición de residuos vegetales. Turrialba (C.R.) 31:39-47.
3. _____; GRIMM, U. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. IV. Modelos y conclusiones. Turrialba (C.R.) 31:101-108.
4. _____. 1987. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. CATIE. Serie de Materiales de Enseñanza no. 29. 475 p.
5. _____. 1991. Umweltverträgliche Landnutzung in den feuchten Tropen. In DSE/ATSAF Landnutzung in den feuchten Tropen. Actas del seminario. Feldafing, Alemania, R.F., s.n. p. 60-79.
6. FOURNIER, L.A. 1980. Fundamentos ecológicos de cultivo del café. IICA. Publicación Miscelánea. 29 p.
7. _____. 1984. Recursos naturales. San José, C.R., Editorial Universidad Estatal a Distancia. 216 p.
8. GOLLEY, F.B.; MEDINA, E. (eds.). 1975. Tropical ecological systems. Berlín, Alemania, R.F., Springer Verlag. 398 p. (Ecological Studies no 11).
9. _____. (ed.). 1983. Tropical rain forest ecosystems. Amsterdam, Holanda, Elsevier Scientific Publishing Company. s.p.
10. GRIMM, U ; FASSBENDER, H.W. 1981. Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. I. Inventario de las reservas orgánicas y minerales (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Al, Na). Turrialba (C.R.) 31:27-37.

11. _____; FASSBENDER, H.W. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. III. Ciclo hidrológico y translocación de elementos químicos con el agua. Turrialba (C.R.) 31:89-99.
12. HART, R.D. 1980. Agroecosistemas, conceptos básicos. CATIE. Serie de Materiales de Enseñanza no. 1. 211 p.
13. INTER-GOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 1990. Report of Working Group III on agriculture, forestry and other human activities. Ginebra, Suiza, IIPC, World Meteorological Organization. s.p.
14. LUGO, A.E.; MORRIS, G.L. 1983. Los sistemas ecológicos y la humanidad. OEA. Serie de Biología. Monografía no. 23. 82 p.
15. MONTALDO, P. 1982. Agroecología del trópico americano. IICA. Serie de Libros y Materiales Educativos. 205 p.
16. ODUM, E.P. 1965. Ecología. México, D.F., Méx., Compañía Editora Continental. 201 p.
17. ODUM, H.T.; PIGEON, R.F. (eds.). 1970. A tropical rain forest. Springfield, Va., EE.UU., Atomic Energy Commission. 1660 p.
18. _____ 1983. Systems ecology: an introduction. New York, EE.UU., J. Willey. 644 p.
19. PATTEN, B.C. 1975. Systems analysis and simulation in ecology. New York, EE.UU., Academic Press. 601 p.
20. POMEROY, L.R.; ALBERTS, J.J. 1988. Concepts of system ecology. Berlín, Alemania, R.F., Springer Verlag. 384 p.
21. SCHULZE, E.D.; ZWOELFER, H. 1987. Potentials and limitations of ecosystem analysis. Berlín, Alemania, R.F., Springer Verlag. 435 p.

CAPITULO SEGUNDO

LOS AGROECOSISTEMAS, CON ESPECIAL REFERENCIA A LOS SISTEMAS DE PRODUCCION AGROFORESTALES

2.1. Los agroecosistemas de América Latina

Los agroecosistemas orientados a mejorar las condiciones de vida del sector agropecuario, dependen regionalmente, de las condiciones abióticas (clima, suelo), de los recursos bióticos (plantas, animales) y de la situación socioeconómica de los campesinos. Según Montaldo (80), para el trópico americano, se precisa buscar un sistema de producción que integre las técnicas agrícolas con las características del ambiente, con el fin de utilizar los recursos naturales y mantener el ecosistema a un nivel productivo sostenido y alto. Los rendimientos promedios en la mayoría de los cultivos del trópico americano, son bajos, si se comparan con aquellos obtenidos en explotaciones comerciales en las mismas áreas, pero en los que se hace uso de tecnología avanzada, con disponibilidad de recursos de tierra y capital.

Mosher (citado en 80) divide la agricultura en agricultura de subsistencia y agricultura comercial. En la de subsistencia, cada campesino usa sólo su propia tierra y a su familia como fuerza de trabajo; en la agricultura comercial, cada granja utiliza y combina insumos de diversas clases, obtenidos de muchas zonas de la economía y produce un excedente de productos para llevar al mercado. El autor antes citado sostiene que la agricultura comercial se compone de labores de labranza, ayuda comercial o de asistencia técnica e investigación agrícola y del medio agrícola compuesto por factores políticos, económicos y culturales. Entre los factores políticos se considera la participación de los agricultores en los procesos políticos de tenencia de la tierra, precios e impuestos y planes de desarrollo. En el aspecto económico, está el transporte, el comercio exterior, la industria y los servicios nacionales. Entre los factores culturales están las tradiciones y los valores, la estructura social y la educación general.

Al tratar de describir los agroecosistemas más importantes en América Latina se deben considerar los cultivos, las modalidades de explotación y los sistemas de agricultura (80).

Es muy grande el número de las especies vegetales explotadas utilizadas en áreas tropicales como elementos bióticos de los agroecosistemas. Existen muchos libros que describen las características agronómicas de los cultivos (52, 67, 73, 80, 88) y sus requerimientos ecológicos y edafológicos, así también como las prácticas de manejo para optimizar las cosechas. Los criterios de clasificación de los cultivos son también múltiples, p.e. botánicos (especies , familias), agronómicos (anuales, bianuales, perennes), socioeconómicos (subsistencia, exportación) o según sus productos.

A continuación se presenta una lista de los cultivos tropicales más importantes de acuerdo con los productos obtenidos (orden alfabético, lista sin orden de importancia en superficie, ni economía de la explotación) (10, 36, 39, 52, 56, 63, 67, 73, 80, 111):

- CEREALES Y GRANOS

Arroz (<u><i>Oryza sativa</i></u>)	Mijo (<u><i>Pennisetum glaucum</i></u>)
Cebada (<u><i>Hordenum</i></u> spp.)	Sorgo (<u><i>Sorghum bicolor</i></u>)
Maíz (<u><i>Zea mays</i></u>)	Trigo (<u><i>Triticum</i></u> spp.)

- LEGUMINOSAS DE GRANO

Frijol (<u><i>Phaseolus vulgaris</i></u>)	Judía tropical (<u><i>Vigna sinensis</i></u>)
Guandú (<u><i>Cajanus cajan</i></u>)	

- TUBERCULOS

Arracacha (<u><i>Arracacia xanthorrhiza</i></u> spp.)	Papa (<u><i>Solanum tuberosum</i></u>)
Camote (<u><i>Ipomea batatas</i></u>)	Taro (<u><i>Colocacia</i></u> spp.)
Marauba (<u><i>Marauba arundinacea</i></u>)	Yuca (<u><i>Manihot utilissima</i></u>)
Ñame (<u><i>Dioscorea</i></u> spp.)	

- OLEAGINOSOS

Coco (<u><i>Cocos nucifera</i></u>)	Ricino (<u><i>Ricinus communis</i></u>)
Maní (<u><i>Arachis hypogaea</i></u>)	Sésamo, ajonjolí (<u><i>Sesamun indicum</i></u>)
Olivo (<u><i>Olea europea</i></u>)	Soya (<u><i>Glycine max</i></u>)
Palma aceitera (<u><i>Elaeis quineensis</i></u>)	Tung (<u><i>Aleurites montana</i></u>)

- FIBRAS

Abacá (<u><i>Musa textilis</i></u>)	Ramio (<u><i>Boehmeria nivea</i></u>)
Algodón (<u><i>Gossypium</i></u> spp.)	Sisal, agave (<u><i>Agave sisalana</i></u>)

Cáñamo (Hibiscus cannabinus)
Ceiba (Ceiba pentandra)

Yute (Corchorus capsularis)

· ESTIMULANTES

Cacao (Theobroma cacao)
Café (Coffea spp.)
Cola (Cola spp.)
Guaraná (Paullinia cupana)

Mate (Ilex paraguayensis)
Tabaco (Nicotiana tabacum)
Té (Thea sinensis)

· MEDICINALES

Chinchona (Chinchona spp.)

Piretro (Pyrethrum cinerariaefolium)

· FRUTALES

Aguacate (Persea americana)
Arbol del pan (Artocarpus altilis)
Cítricos (naranja, toronja,
mandarina, pomelo, limón
tangerina, etc.) (Citrus spp.)
Dátil (Phoenix datilifera)
Guaba (Inga spp.)
Guanábana (Annona squamosa)
Guayaba (Psidium quajava)

Mango (Mangifera indica)
Maracuyá (Passiflora edulis)
Papaya (Carica papaya)
Pejibaye (Bactris gasipaes)
Piña (Ananas comosus)
Plátano (Musa spp.)
Zapote (Manilkara sapota,
Achras sapota)

· ESPECIES Y CONDIMENTOS

Canela (Cinnamomum zeylanicum)
Cardamomo (Elettaria cardamomum)
Clavo (Syzygium aromaticum)
Cúrcuma (Curcuma longa)

Jengibre (Zingiber officinale)
Mostaza (Brasica juncea)
Pimienta (Piper nigrum)

· OTROS

Acaju (Anacardium occidentale)
Calabaza (Cucurbita spp.)
Caña de azúcar (Saccharum
officinarum)
Caucho, hule (Hevea brasiliensis)

Chayote (Sechium edulis)
Palma babacu (Orbignya oleifera)
Palma catetu (Areca catecu)
Sandía, melón (Citrullus spp.)

Además existen otros cultivos poco conocidos, con un potencial agrícola aún por estudiarse. Para la zona amazónica, Alvim (6) ha mencionado los siguientes:

Achiote	(<u>Bixa orellana</u>)
Buruti	(<u>Mauritia flexuosa</u>)
Guaraná	(<u>Paullinia cupana</u>)
Nuez del Brasil	(<u>Bertholletia excelsa</u>)
Palmito	(<u>Euterpe oleraceae</u>)
Palo de aceite	(<u>Copaifera</u> spp.)
Piquia	(<u>Caryocar villosum</u>)
Seje	(<u>Jessenia</u> spp.)
Sorva	(<u>Couma</u> spp.)

Según Montaldo (80) los 17 cultivos más importantes del trópico latinoamericano, de acuerdo con el área de explotación y significación económica, son los siguientes, en orden alfabético:

Ajonjolí, sésamo (<u>Sesamum indicum</u>)	Frijoles, caraotas, (<u>Phaseolus</u> spp.)
Algodón (<u>Gossypium</u> spp.)	Maíz (<u>Zea mays</u>)
Arroz (<u>Oryza sativa</u>)	Ñame (<u>Dioscorea</u> spp.)
Bananos, plátanos (<u>Musa</u> spp.)	Palma de aceite (<u>Elaeis guineensis</u>)
Café (<u>Coffea arabica</u>)	Cacao (<u>Theobroma cacao</u>) (robusta)
Piña (<u>Ananas comosus</u>)	Sorgo (<u>Sorghum bicolor</u>)
Caña de azúcar (<u>Saccharum officinarum</u>)	Tabaco (<u>Nicotiana tabacum</u>)
Caucho, hule, jebe (<u>Hevea brasiliensis</u>)	Yuca, mandioca (<u>Manihot utilissima</u>)
Coco (<u>Cocos nucifera</u>)	

La distribución de los cultivos en los diferentes países y regiones de América Latina es muy específica. A continuación se presenta como ejemplo la distribución por cultivos, en Costa Rica (51):

Cultivo	Superficie (1000 ha)
Café	83,4
Arroz	65,4
Maíz	51,8
Caña de azúcar	38,7
Banano	36,1
Frijol	26,6
Cacao	20,3
Plátano	6,4
Guineo cuadrado	3,5
Papas	2,0
Piña	0,7
Naranja	0,4

La lista de las especies forrajeras utilizadas en los pastizales y praderas de América Latina es muy amplia. Se trata de gramíneas de características ecológicas generalmente muy amplias y de leguminosas de ocurrencia espontánea, de mayor o menor importancia en las praderas.

Las especies de gramíneas más agresivas que están ampliamente distribuidas por todo el trópico americano son: pasto guinea (Panicum maximum), pasto pará (Brachiaria mutica), pasto gordura o capim melao (Melinis minutiflora), yaraguá (Hyparrhenia rufa), pasto kikuyo (Pennisetum clandestinum), y pasto pangola (Digitaria decumbens) (80). Las especies anteriores son originarias de África y actualmente están naturalizadas por toda la tierra caliente y templada, con excepción del pasto kikuyo que crece en lugares superiores a los 1500 m de altitud y que se considera la mejor especie entre las citadas. El pasto elefante (Pennisetum purpureum), el pasto estrella (Cynodon plectostachyus) y el pasto alemán (Echinochloa polystachya) son otras especies perennes de gramíneas ampliamente utilizadas para formar praderas cultivadas (80). De acuerdo con FAO (42) y al ICA (Instituto Colombiano Agropecuario, 64), las especies nativas más importantes son:

Gramíneas forrajeras

Agrostis alba

Axonopus spp., micay

Leguminosas forrajeras

Cajanus cajan, guandú, frijol de palo

Calopogonium mucunoides, rabo de iguana

Avena sativa, avena forrajera
Brachiaria spp., braquiaria, pastopara
Bromus spp., pasto bromo suave
Chloris gayana, pasto Rhodes
Cynodon dactylon, pasto bermuda
C. plectostachyus, pasto estrella
Digitaria decumbens, pasto pangola
Festuca arundinacea, festuca alta
Holcus lanatus, pasto lanudo
Hyparrhenia rufa, pasto yaragua
Lolium spp., raygras
Melinis minutiflora, pasto gordura
Panicum spp., pasto guinea
Paspalum spp., pasto bahía
Pennisetum clandestinum, pasto kikuyo
P. purpureum, pasto elefante
Phalaris spp., pasto alpiste
Poa pratensis, pasto Kentucky
Sorghum spp., pasto Sudán, sorgo
Trachypogon spp., forrajero. paja del llano
Trypsacum laxum, pasto Guatemala

Centrosema spp., centrosema
Clitoria ternatea, clitoria, zapato de reina
Crotalaria spp., crotalaria
Desmodium spp., pega-pega
Dolichos lablab, dolicos
Glycine spp., soya
Indigofera spp., añil, índigo
Leucaena leucocephala, acacia forrajera
Lotus corniculatus, trébol de pájaro
Melilotus alba, trébol blanco
Medicago sativa, alfalfa
Phaseolus spp., frijol, siratro
Pueraria phaseoloides, Kudzú tropical
Schizolobium deeringianum, frijol tercipele
Stylosanthes gracilis, alfalfa del Brasil
Trifolium spp., trébol
Teramnus uncinatus, veza común
Vigna sinensis, frijol caupí
Zornia diphylla, zornia

Cualquiera que sean las especies que se utilicen como pastizal artificial, es importante que el agricultor haga un buen manejo de ellas, siguiendo un conjunto de técnicas tales como: rotación de potreros, control de malezas, riego (si es del caso), fertilización, uso adecuado de la especie, ya sea como pasto de corte o como de pastoreo directo; en este último caso debe elegirse apropiadamente la carga animal, la época

y la duración del pastoreo (67).

En la lista de las especies utilizadas como cultivos en áreas tropicales, se observa una gran cantidad de ejemplos de cultivos arbustivos permanentes. Los grupos más importantes pertenecen a especies oleaginosas, estimulantes y frutos. Dentro de los 17 cultivos más importantes (Montaldo, 80), pertenecen a estos grupos los siguientes: banano, cacao, café, caucho, cocotero, palma aceitera.

Estos cultivos producen cosechas de exportación y por ello se aplican en su explotación gran cantidad de tecnologías agrícolas costosas como p.e. fertilización, encalado, regadío, control de plagas y enfermedades.

En los sistemas de producción forestales se logra una cobertura permanente del suelo y traen como resultado, condiciones del ciclo de la materia orgánica y de los elementos nutritivos similares a los de los ecosistemas naturales. La diferencia más notable radica en la selección de especies forestales con el objeto de producción de madera o de otros productos secundarios.

La lista de especies utilizadas es muy grande y se diferencian las especies nativas, de las exóticas. Las especies introducidas son preferidas por su desarrollo acelerado, su producción alta de madera y su validez conocida. Entre ellas se encuentran:

Coníferas

<u>Araucaria angustifolia</u>	Araucaria brasileña
<u>Cupressus lusitanica</u>	Ciprés
<u>Pinus</u> spp. (<u>caribaea</u> , <u>elliottii</u> , <u>oocarpa</u> , <u>patula</u> , <u>radiata</u>)	Pinos
<u>Podocarpus</u> spp.	Pino aparrado

Caducifolias

<u>Acacia</u> spp. (<u>arabica</u> , <u>dealbata</u> , <u>mearnsii</u> , etc.)	Acacias
<u>Albizia</u> spp.	Albicia, lagarto
<u>Alnus jorullensis</u>	Jaúl, lambran
<u>Anacardium rhinocarpus</u>	Espavel, mijao
<u>Anthocephalus chinensis</u>	Cadam
<u>Bombacopsis quinata</u>	Pochote, ceiba
<u>Cassia siamea</u>	Casia

<u>Casuarina equisetifolia</u>	Casuarina, pino australiano
<u>Cedrela odorata</u>	Cedro (amargo)
<u>Ceiba pentandra</u>	Ceibo
<u>Cordia alliodora</u>	Laurel
<u>Dalbergia latifolia</u>	Cocobolo
<u>Eucalyptus spp. (alba, camaldulensis, deglupta, grandis, globulus, saligna)</u>	Eucalipto
<u>Gmelina arborea</u>	Melina
<u>Grevillea robusta</u>	Gravilea
<u>Inga spp.</u>	Guaba
<u>Leucaena leucocephala</u>	Leucaena
<u>Ochroma lagopus</u>	Balsa
<u>Parkinsonia aculeata</u>	Palo del rayo
<u>Paulownia tomentosa</u>	Kiri
<u>Prosopis spp. (juliflora, tamarugo)</u>	Algarrobo
<u>Sesbania bispinosa</u>	Agati
<u>Swietenia macrophylla</u>	Caoba
<u>Tectona grandis</u>	Teca
<u>Terminalia spp. (catappa, ivorensis, superba)</u>	Terminalia

Entre las especies forestales nativas, promisorias para plantaciones en áreas tropicales, especialmente en América Central, Colombia, Brasil, Ecuador y Surinam, se encuentran las siguientes (115) (orden alfabético):

Brosimum utile
Calophyllum brasiliense
Carapa guianensis
Carinaria pyriformis
Cedrela odorata
Cedrela fossilis
Cedrelinga cataeniformis
Cordia alliodora
Cordia aporensis
Dialanthera gracilipes
Didymopanax morototonii
Genipa americana
Gupia glabra
Hieronyma chocoensis
Jacaranda copaia
Simarouba amara

Swietenia macrophylla

Virola dixonii

Virola reidii

Virola surinamensis

2.2. Los sistemas de agricultura en América Latina

La agricultura migratoria o de "quema y roza" puede definirse como un sistema agrícola, continuo, de producción de cultivos anuales o perennes, de corto plazo, alternados con periodos de descanso. La agricultura migratoria es el sistema agrícola que predomina en el área del trópico americano (80). Ocurre tanto en las zonas bajas escasamente pobladas como en las montañas y altiplanicies densamente pobladas, sin usar herramientas de arado, ni fertilizantes. Este sistema es la forma principal de agricultura encontrada en la cuenca del Amazonas, que cubre alrededor del 45% del Brasil, 70% de Bolivia y un elevado porcentaje de Colombia, Ecuador y Perú. Además, se practica en casi todas las Antillas, la costa del Caribe de Centroamérica, la costa del Pacífico de Colombia y las sabanas y montañas de Venezuela (80).

Cualquier intento de explotación de los bosques, empieza con su tala y quema, que en primera instancia produce una interrupción en el ciclo natural de nutrimentos y en especial el de la materia orgánica, debido a que se interrumpe la producción de residuos vegetales y ya no ocurre su descomposición y mineralización. Además, el suelo queda expuesto a los fenómenos climáticos que causan diversos problemas, como la erosión hídrica. Los efectos de la quema son muy variados, siendo el primero el calentamiento superficial del suelo que conlleva a la destrucción de parte del mantillo. Además, perturba las diversas propiedades del suelo y también de la población microbiana del mismo (ver descripción detallada en 48). Es un hecho comprobado en los trópicos, que la fertilidad de los suelos y las cosechas disminuye rápidamente después de la tumba y quema de los bosques y de la explotación del mismo.

Generalmente, después de una explotación intensiva del suelo, entre dos y cinco años, se alcanza un grado total de agotamiento de la fertilidad del mismo y los agricultores optan por abandonar la parcela y tratan de encontrar una nueva, para iniciar un nuevo ciclo de explotación, lo que da la nota típica del sistema rotativo en el uso agrícola del suelo (ver detalles en 48). En las parcelas abandonadas se produce una recuperación progresiva, a largo plazo, de las condiciones del suelo y de su fertilidad. La duración de la regeneración es entre ocho y 30 años, aunque bajo condiciones favorables del suelo, se puede acortar bastante. En esta etapa de "descanso" del suelo se desarrolla

un bosque secundario, se acumulan de nuevo elementos nutritivos en la vegetación, se restablece la producción de restos vegetales y su mineralización y finalmente el suelo alcanza su fertilidad original.

El sistema de agricultura migratoria, ha operado por siglos con el propósito de obtener la subsistencia de los pobladores. Practicado de forma moderada, hace poco daño a las zonas de bosques densos, debido a que el fuego no se propaga más allá de las zonas abiertas y los períodos de descanso son lo suficientemente largos como para restaurar la fertilidad del suelo, a su nivel original (80).

El cultivo migratorio no es sólo de subsistencia, sino también comercial, lo que ha traído como consecuencia que los períodos de descanso sean cada vez más cortos, con una baja en el nivel de fertilidad. Sin embargo, hay que entender este sistema dentro de las limitaciones ambientales y sociales, antes de considerar las mejoras que puedan ser hechas. Como la agricultura migratoria es practicada por pueblos que difieren en cultura y costumbres, en diferentes zonas climáticas y de vegetación y dentro de una amplia gama de condiciones de suelos, hay una gran variación en los cultivos sembrados, los métodos culturales utilizados y la intensidad del cultivo. Las principales zonas de vegetación en las que este sistema se usa, son el bosque sempervirente, el bosque semidecídúo y las sabanas.

Los métodos y la intensidad del cultivo son también influidos por la tenencia de la tierra y por el sistema de colonización o asentamiento posible para los campesinos. El tipo de asentamiento influye en la densidad de la población local y por lo tanto, en la intensidad del cultivo local (80).

La intensificación de la tecnología aplicada en los sistemas de producción, implica un uso más exhaustivo del suelo. Con base también, en la aplicación de otros insumos de producción (48). Así, resultan ser sistemas semipermanentes (cobertura del suelo ante un período intermedio de tiempo) y sistemas permanentes. Las especies utilizadas son generalmente, lucrativas en los mercados locales o de exportación, resultando así, que son comúnmente, sistemas de monocultivos.

En los sistemas de producción pecuarios, se tienen praderas de cobertura permanente del suelo, con técnicas de producción y manejo muy específicas: rotación de potreros, control de malezas, fertilización, etc

Con base en las plantaciones arbustivas (frutales, cultivos con especies arbustivas) se tiene una cobertura perfecta del suelo, así resulta un control de erosión adecuado y un menor riesgo comercial, que con los cultivos anuales. La exportación de frutas permite el financiamiento de tecnologías costosas como p.e. fertilización, regadío, control de plagas y enfermedades (49).

En los sistemas de producción forestales resultan condiciones del ciclo de materia orgánica y de elementos nutritivos similares a los de ecosistemas naturales.

2.3. La necesidad de la agricultura sostenida

En los agroecosistemas y los sistemas de agricultura tropical y subtropical descritos en los acápite anteriores se generan serios problemas biológicos, ecológicos y socioeconómicos, cuya solución son un reto muy importante para mejorar las condiciones de vida en el sector agropecuario.

La necesidad del aumento de la producción de alimentos para la población creciente, tiene limitaciones muy agravantes, relacionadas con la conservación de los ecosistemas naturales (7, 40, 44, 79, 82, 108, 109, 110). Además, se enfrenta a limitaciones socioeconómicas difíciles de solucionar, como por ejemplo: la falta de infraestructuras, deficiencias en la educación campesina, problemas de los sistemas de extensión agrícola, pobreza y problemas nutricionales, sanitarios, energéticos (en el medio campesino agrícola), inseguridad, desempleo, reglamentación jurídica de precios e impuestos, determinación de la política de tenencia y explotación de la tierra y especialmente, limitaciones en el tamaño de las parcelas de los campesinos. Todo esto trae como resultado, una agricultura de subsistencia, poco efectiva (108, 109, 110).

Cada uno de los sistemas de agricultura tiene también sus limitaciones y características (o condiciones) específicas. Así, la agricultura migratoria o rotativa, es equilibrada solo en las comunidades agrícolas, sin mayor presión demográfica, en la cual se cultiva de acuerdo con las necesidades y se deja recuperar al suelo todo el tiempo necesario para mantener su fertilidad inalterada (48, 80, 99).

La eficiencia de otros sistemas de producción agrícola o pecuaria, semipermanentes o permanentes, se puede caracterizar, por un lado, con una producción muy elevada de los cultivos y pastos y por el otro lado, por una disminución progresiva de la fertilidad del suelo. Las raíces alimenticias (yuca, camote, papa) se caracterizan por sus altos

rendimientos y la producción equiparable de residuos vegetales que se involucran en el suelo. En algunos de los cultivos agrícolas de exportación (algodón, café, té, tabaco, caucho, cacao, coco) que producen cantidades pequeñas de biomasa de cosecha, se tiene un valor comercial muy elevado. Algunas especies frutales (piña, banano, palma aceitera) se caracterizan por una producción de biomasa elevada. Igualmente, la producción de las gramíneas forrajeras, especialmente las de corte, que es muy elevada. La compensación de las pérdidas de fertilidad del suelo (extracción de elementos nutritivos, erosión) se basa en la aplicación de tecnologías costosas como p.e. selección de cultivos y especies, fertilización, encalado, irrigación, control de malezas, prácticas de control de la erosión, etc.

En los últimos años se aplica en forma creciente, el término "agricultura sostenida", definida como un sistema con un manejo exitoso de los recursos para que la agricultura satisfaga las necesidades humanas cambiantes, manteniendo o reforzando la calidad del medio ambiente y conservando los recursos naturales (7, 40, 44, 45, 79, 108, 109, 110, 119, 122). La sostenibilidad biológica implica la conservación de las especies de plantas y animales, con base en una máxima producción y una constante renovación. El desarrollo sostenible requiere que los impactos adversos en la calidad del aire, agua, suelo y elementos naturales sean minimizados, para conservar la integridad global de los ecosistemas. La sostenibilidad social implica la sobrevivencia de la especie humana con la persistencia de todos los componentes de la biosfera.

2.4. El modelaje de agroecosistemas

El modelaje de agroecosistemas puede asociarse a la descripción de un monocultivo en una área específica o la cuantificación de cultivos asociados o múltiples en un determinado lugar.

Los modelos por utilizarse deben cumplir los requisitos enumerados para los ecosistemas naturales (49, 89):

- Límites
- Componentes bióticos y abióticos
- Fuentes de ganancia y pérdidas
- Interacciones entre los componentes

En la Figura 2.1 se presenta un modelo para los agroecosistemas que forman una finca (56, 96, ver en 11). Utilizando los símbolos de Odum (89) los límites de los agroecosistemas están definidos dentro del área que ocupan en la finca. Las fuentes de ganancia son de carácter primario o natural (energía, agua de lluvia y elementos nutritivos de la meteorización) o secundario o artificial (mano de obra, insumos de producción, capital o dinero, animales,

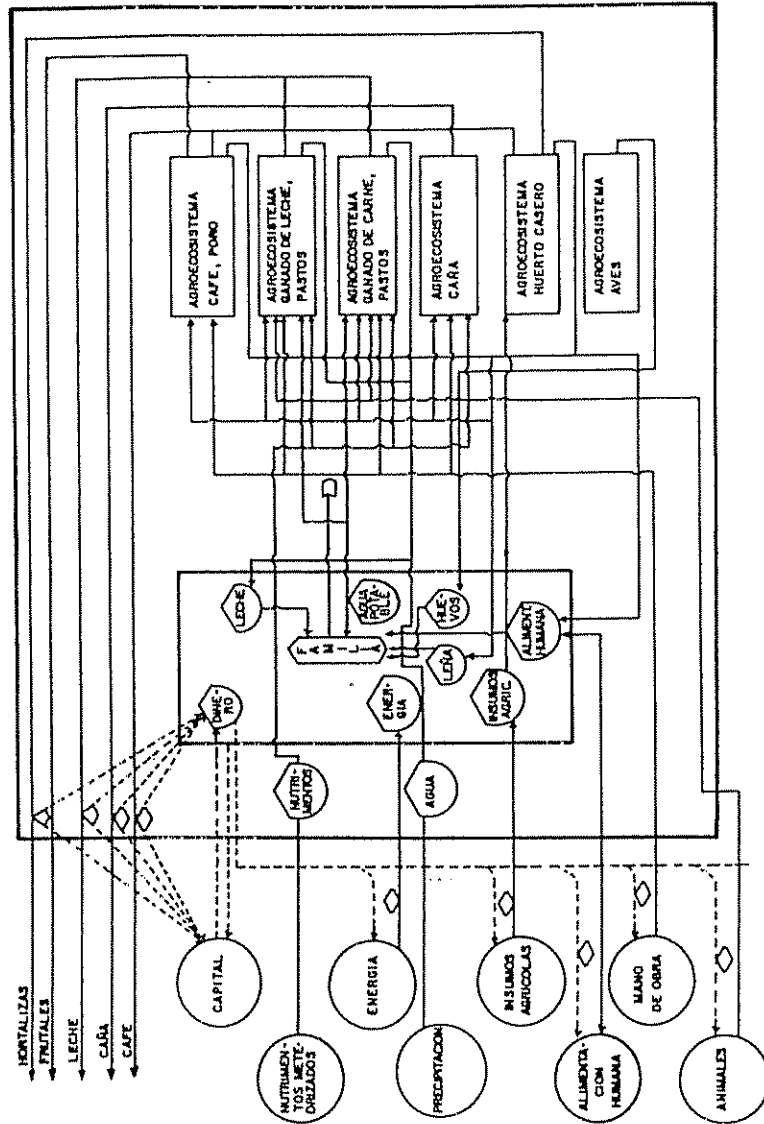


Figura 2.1. Modelaje de los agroecosistemas de una finca (56, 96, ver en 11).

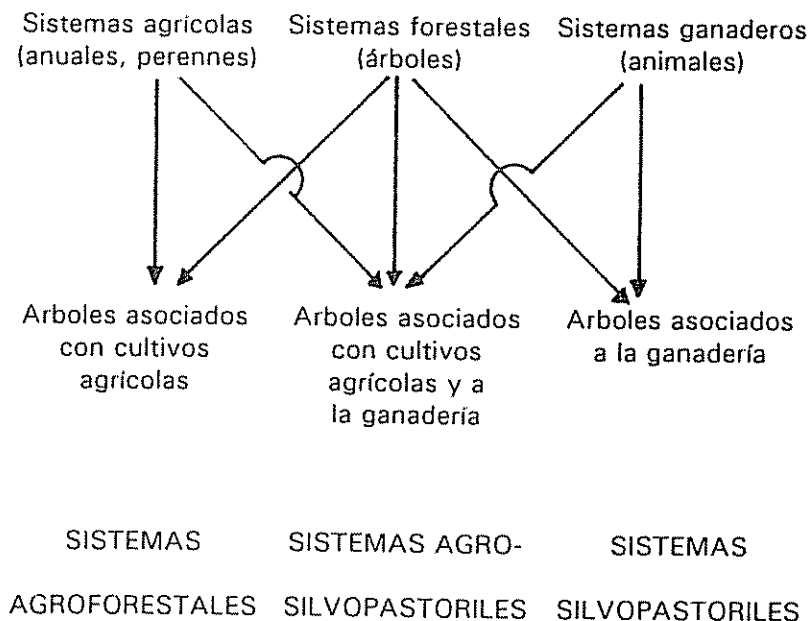
alimentación). La familia y el núcleo de producción regulan y determinan a los componentes bióticos de los agroecosistemas dentro de la finca, en función de los requerimientos para la producción. En el caso específico de la finca descrita se tienen salidas y producciones de hortalizas, frutales, leche, caña y café. Con estas salidas se obtienen beneficios económicos y capital para manejar la finca. Los productos del huerto familiar y de las aves y parcialmente la leche y carne del ganado, no salen del sistema y son utilizados directamente por la familia. Lógicamente para la alimentación del ganado se producen los pastos necesarios, dentro de la finca.

2.5. Sistemas de producción agroforestales

2.5.1 Conceptos generales, definiciones

Los sistemas de producción agroforestales se definen como una serie de sistemas y tecnologías del uso de la tierra en las que se combinan árboles con cultivos agrícolas y/o pastos, en función del tiempo y espacio para incrementar y optimizar la producción en forma sostenida

De la integración de los sistemas resultan tres combinaciones principales (23, 33, 49):



En algunos casos se ha utilizado el término "agroforestería" para describir a los sistemas o técnicas agroforestales. De ello ha resultado una serie de discusiones en la terminología a usarse.

La palabra "agroforestería" llegó al español por vía anglosajona, aunque este término se origina de dos palabras latinas (agri, campo y foresta, bosque). Pero al derivarse del inglés, su uso preocupa a algunos hispanoparlantes, particularmente a los turistas. En México, a través de FAO, se llegó a la conclusión que el término 'agrosilvopastoril' define con precisión la combinación productiva de tres elementos: el bosque, los cultivos y el ganado (59). Pero, el término es un adjetivo y no un sustantivo como lo es "agroforestería". Entonces, habría que usar el término como un sustantivo compuesto: "sistemas agrosilvopastoriles", el cual resulta largo. La opción "sistemas agroforestales" presenta inconvenientes: el vocablo agro no da claramente la idea de que se incluye a los componentes agrícola y pecuario (pareciera que sólo se incluye a los cultivos), por otro lado también "agroforestal" es un adjetivo y necesita un sustantivo. "Agrodasonomía" sí es un sustantivo pero la palabra dasonomía está en desuso y esto podría confundir al lector. El término "agrosilvicultura" se utiliza generalmente para describir las técnicas de rotaciones agrícolas seguidas por rotaciones forestales, también conocido como "sistema Taungya". Como antecedente importante se indica que al celebrarse en marzo de 1979, en Turrialba, Costa Rica, un taller sobre "Sistemas Agroforestales en América Latina". Combe y Budowski (33) describieron las "técnicas agroforestales" como una opción en la utilización de tierras en las regiones tropicales y subtropicales del mundo, en la búsqueda de técnicas que integren, sobre una misma superficie, diferentes modalidades de producción con distintas especies que tienen exigencias distintas. Para facilitar los términos de referencia, en la publicación de Heuveldop y Lagemann (59) se aceptó el término "agroforestería" como la palabra adecuada para expresar en español el concepto de "agroforestry".

En el desarrollo de esta obra se hará uso, sin embargo, del término "sistemas agroforestales" como generalización de los mismos y sus tecnologías y prácticas por describirse.

A través de los años, se han dado numerosas definiciones del término "sistemas agroforestales" o "agroforestería", algunas de las cuales suponen condiciones muy específicas y otras suponen la existencia de áreas superpuestas; algunos ejemplos son:

ICRAF/Nairobi (65): "La agroforestería se ha definido como un sistema sostenido del manejo de la tierra que aumenta su rendimiento

total, combina la producción de cultivos (incluyendo cultivos arbóreos) con especies forestales y/o animales, en forma simultánea o secuencial sobre la misma superficie de terreno, y aplica prácticas de manejo que son compatibles con las prácticas culturales de la población local".

Von Maydell (2, 78): "La agroforestería significa, primordialmente, y en forma muy general, una combinación de las prácticas forestales con agricultura y/o pastoreo sobre la misma unidad de superficie. En vista de las grandes diferencias que existen entre los paisajes naturales y otros dominados por fincas, y la diversidad de estructuras socioeconómicas de las diferentes regiones se requieren, desde luego, definiciones posteriores más precisas para cada caso. Básicamente, deberíamos referirnos a la agroforestería sólo en aquellos casos en que los árboles y los arbustos, así como los cultivos agrícolas y los animales de pastoreo, se encuentran juntos sobre una determinada parcela de terreno, en forma tal que se pueda demostrar una influencia ecológica mutua. El resultado es que, por un lado, las plantas y animales están en competencia mutua, pero por otro lado, existe o puede crearse cierta dependencia ecológica mutua, y que, finalmente, varias especies se complementen en términos de tiempo y espacio".

Budowski (1, 23, , 33, 59): "Se entiende por agroforestería el conjunto de técnicas de uso de la tierra que impliquen la combinación de árboles forestales con cultivos, con ganadería o con ambos. La combinación puede ser simultánea o secuencial en términos de tiempo y espacio. Tiene por objetivo optimizar la producción total por unidad de superficie, respetando el principio de rendimiento sostenido".

En un trabajo reciente, Somarriba (104) propone definir la agroforestería como "una forma de cultivo múltiple en la que se cumplen tres condiciones fundamentales: 1) existen al menos dos especies de plantas que interactúan biológicamente, 2) al menos uno de los componentes es una leñosa perenne, y 3) al menos uno de los componentes es una planta manejada con fines agrícolas (incluyendo pastos)". En esta definición de depura la disciplina agroforestal y se eliminan argumentos innecesarios (arreglos en función de tiempo y espacios, maximización de cosechas, sostenibilidad) y se propone una caracterización simple de la agroforestería.

2.5.2. Clasificación de los sistemas agroforestales

Como quedó indicado anteriormente, en función de las asociaciones o estructuras entre las especies vegetales o componentes de los sistemas agroforestales, se tiene el primer nivel de clasificación, resultando los siguientes tres grupos (33, 49, 59):

- Sistemas agroforestales asociando, árboles con cultivos agrícolas
- Sistemas agrosilvopastoriles, asociando árboles con cultivos agrícolas y pastos (con o sin pastoreo directo)
- Sistemas silvopastoriles, asociando árboles con pastos (ganadería)

En función de la extensión en área, de la intensidad en distribución, se utilizan los términos:

- Sistemas, asociando tipos de uso de la tierra comunes en una área geográfica determinada. En este caso los componentes, técnicas de manejo, situación socioeconómica, etc. son comparables y típicas para una región
- Subsistemas, con un grado de jerarquía inferior, tipificando asociaciones agroforestales de menor área e intensidad. En una región determinada de varios subsistemas resulta un sistema agroforestal.
- Prácticas, indicando operaciones de manejo agroforestal para un subsistema o sistema dado.

Un segundo nivel de clasificación resulta de la función del componente arbóreo o forestal del sistema. Las funciones principales identificadas son:

- Producción de madera de construcción o de exportación, leña, forraje para ramoneo, frutos, etc.
- Protección y servicios, considerándose el mejoramiento del suelo, sombra para cultivos y/o animales, cercas vivas, cortinas rompevientos.

De los dos primeros niveles de clasificación resultan, según Combe y Budowski, los arreglos presentados en el Cuadro 2.1 (23, 33).

El Cuadro 2.1 que se presenta, tiene tres limitaciones importantes:

1. Los sistemas agrosilvopastoriles no se mencionan. Esto se debe al hecho que estos sistemas son mucho más complejos que los

sistemas de dos componentes. El gran número de combinaciones posibles hacen difícil su evaluación.

De manera general, estos sistemas están caracterizados por una estrecha combinación de objetivos. El componente forestal ejerce tanto una función productora como protectora.

2. Se ordenan las técnicas agroforestales según la función principal del componente forestal, conscientes de que estas funciones son generalmente combinadas y varían con el tiempo.
3. Por último, siempre es posible observar, sobre una misma superficie, muchos tipos de componentes forestales, suponiendo las funciones iguales o distintas. Ejemplos: Cercas vivas y árboles de sombra sobre un pastizal; árboles de sombra y árboles de valor en un cultivo perenne.

Cuadro 2.1. Clasificación de los principales sistemas agroforestales según sus funciones (23, 33).

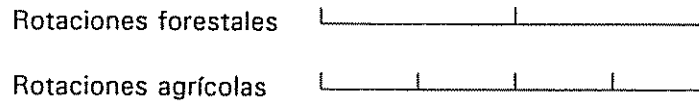
FUNCION PRINCIPAL	SISTEMAS AGROFORESTALES		SISTEMAS SILVOPASTORILES	
	PRODUCCION	PROTECCION Y SERVICIOS	PRODUCCION	PROTECCION Y SERVICIOS
	Agrosilvicultura (Método Taungya)	Cercas vivas	Pastoreo en bosque	Cercas vivas
	Arboles de valor asociados a los cultivos	Rompevientos	Pastoreo en las repoblaciones forestales jóvenes	Rompevientos
	Arboles frutales asociados a los cultivos	Arboles de sombra en los cultivos	Arboles frutales asociados con los pastizales	Arboles de sombra en los pastoreos
		Arboles para la conservación y el mejoramiento del suelo (del clima, del agua, etc.)	Arboles frutales asociados con los pastizales	Arboles para la conservación y el mejoramiento del suelo (del clima, del agua, etc.)
			Arboles forrajeros	

De acuerdo con Combe y Budowski (33) en el tercer nivel de clasificación, se considera la distribución del componente forestal en el tiempo y en el espacio. En el tiempo, la combinación de un componente forestal con los cultivos y/o con la ganadería, puede ser temporal o permanente. En sentido estricto, una combinación no es permanente si la duración de rotación de especies que se hallan asociadas es la misma. Esto no sucede sino raramente y por consiguiente no se sujeta a este criterio. En la práctica, la distribución propuesta es la siguiente:

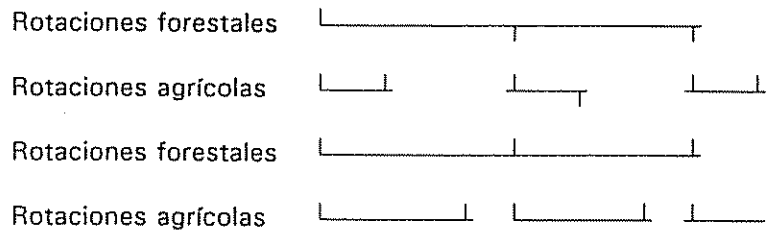
- La combinación es permanente, si es mantenida durante una o más rotaciones del componente forestal. Esto incluye la renovación continuada del cultivo que se halla asociado.
- La combinación es temporal, si dura menos de una rotación del componente forestal. Esto incluye la producción agrícola y forestal secuenciales. Esta combinación puede repetirse varias veces.

La distribución de combinaciones agroforestales en el tiempo se puede esquematizar de la siguiente manera:

1. Combinaciones permanentes



2. Combinaciones temporales



La repartición en el espacio del componente forestal, combinada con cultivos y/o con ganadería, puede ser regular (homogénea) o irregular (heterogénea). En el segundo caso, se habla igualmente de combinación contigua.

- La repartición es regular si el componente forestal se halla mezclado entre el cultivo agrícola. Esto incluye tanto la regeneración natural como la plantación de árboles forestales.

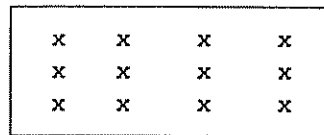
Cuadro 2.2. Principales sistemas agroforestales según su distribución en el tiempo y en el espacio (según Combe y Budowski 33).

T I E M P O	
	COMBINACION PERMANENTE
Repartición Regular	Agrosilvicultura Agrosilvicultura (Método Taungya de repoblación forestal)
E S P A C I O	Pastoreo en las plantaciones Arboles de valor en los cultivos Arboles frutales en los cultivos Pastoreo (o producción de forraje en los bosques secundarios) Arboles productores del forraje Arboles de sombra en los cultivos o en los pastizales. Arboles para el mejoramiento de la fertilidad del suelo.
Repartición irregular	Cercas vivas Rompevientos

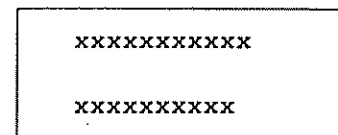
- La repartición es irregular si el componente forestal está situado al costado o alrededor del cultivo agrícola, con el cual está en relación. Esto es ante todo el caso de plantaciones en líneas y en bandas

La repartición de las combinaciones agroforestales en el espacio se puede representar de la siguiente manera (cada x representa un árbol):

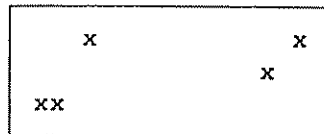
1. Repartición regular



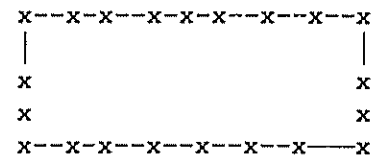
2a. Repartición irregular, bandas



2b. Repartición irregular dispersa



2c. Repartición irregular, cercas



La densidad de árboles indica su número por unidad de superficie. En reparticiones irregulares dispersas puede ser menor. En huertos familiares generalmente se tiene un número grande de especies y una densidad alta por unidad de superficie.

En función del arreglo en el tiempo y espacio puede encontrarse la distribución de prácticas y sistemas agroforestales presentadas en el Cuadro 2.2 (33).

Nair (86, 87) ha propuesto otros niveles de clasificación considerando aspectos agroecológicos y adaptación ambiental (p.e. sistema en/para zonas montañosas subtropicales secas, zonas bajas húmedas tropicales, etc.) y socioeconómicas y de nivel de manejo (p.e. marginal, bajos o altos insumos, subsistencia, comercial, etc.).

En función de los diferentes niveles de clasificación resulta un arreglo múltiple y complicado de los sistemas agroforestales, tal como se presenta en el Cuadro 2.3, de acuerdo con la proposición original de Combe y Budowski (33), con complementaciones actuales.

La distribución y clasificación regional de las prácticas y sistemas agroforestales es a veces complicada, ya que especialmente los componentes arbóreos generalmente cumplen diferentes objetivos. Según Budowski (24, 28) un árbol de uso múltiple es aquel que además de los productos normalmente esperados tales como madera, influencias microclimáticas, mejoramiento del suelo y aporte de materia orgánica, suministra productos y servicios adicionales significativos tales como fijación de nitrógeno, forraje, productos alimenticios, gomas, resinas, fibras y productos medicinales. De acuerdo con el mismo autor, existe una necesidad de examinar y evaluar críticamente tales caracteres, los que se describen bajo la siguiente enumeración:

- 1) usos directos
- 2) usos de protección (conservación de suelos, protección contra viento, mejora de la infiltración de agua, refugio de aves, etc.),
- 3) hábitos de crecimiento (velocidad de crecimiento, arquitectura de las ramas, de las raíces, relaciones corona/raíces, forma y densidad de la corona, autopoda o persistencia de las ramas y las variaciones que se esperan según varía el ambiente),
- 4) aspectos morfológicos o fisiológicos de interés (longevidad, raíces tablares o fulcreas, espinas, toxicidad a humanos o animales, hábitos deciduos o de persistencia de hojas, aspectos relevantes de raíces, tolerancia a la sombra),
- 5) producción de biomasa en cuanto a calidad y cantidad (ej.: valor forrajero),
- 6) capacidad de retoño al cortar,
- 7) propagación (características de semillas, estacas, etc.),
- 8) descomposición de hojas (rapidez, calidad de la materia orgánica, influencia sobre el suelo),
- 9) tolerancia al fuego,
- 10) influencia sobre el suelo,

Cuadro 2.3. Clasificación de los sistemas agroforestales (33), (ampliado por el autor).

1. Tipo de cultivos asociados	I SISTEMAS AGROFORESTALES				II SISTEMAS AGROSILVOPASTORILES				III SISTEMAS SILVOPASTORILES			
	Producción		Protección Servicios		Producción		Protección Servicios		Producción		Protección Servicios	
3. Distribución en el tiempo	Tempo-ral	Perma-nente	Tempo-ral	Perma-nente	Tempo-ral	Perma-nente	Tempo-ral	Perma-nente	Tempo-ral	Perma-nente	Tempo-ral	Perma-nente
Regular	1	2		4		1		2	2,3		4	
Repartición en el espacio									4,5			
Irregular		3,7,8		5,6,7		2		3	6		8	9
		9		8,9							9	

I. Sistemas silvoagrícolas

- 1) Agrosilvicultura ("Método Taungya" o "Sistemas Taungya")
- 2) Árboles de valor en los cultivos
- 3) Árboles frutales en los cultivos
- 4) Árboles productores de sombra en los cultivos y/o mejoradores de la fertilidad del suelo
- 5) Cercas vivas
- 6) Rompevientos
- 7) Cultivos en fajas (alley cropping)
- 8) Sistemas agroforestales múltiples
- 9) Huertos caseros

II. Sistemas agrosilvopastoriles

- 1) Cultivos y ganadería simultánea en las plantaciones
- 2) Árboles asociados a los cultivos y ganadería
- 3) Cercas vivas alrededor de comunidades rurales

III. Sistemas silvopastoriles

- 1) Pastoreo (o producción de forraje) en las plantaciones forestales
- 2) Pastoreo (o producción de forraje) en los bosques secundarios
- 3) Árboles maderables en los pastizales
- 4) Árboles de servicios en los pastizales, mejorados de la fertilidad del suelo por la fijación del nitrógeno
- 5) Árboles frutales en los pastizales
- 6) Árboles productores de forraje
- 7) Cercas vivas
- 8) Rompevientos

- 11) respuesta a diferentes regímenes de poda,
- 12) capacidad de aportar nitrógeno,
- 13) posibilidades de mejoramiento genético,
- 14) insectos, enfermedades y otras plagas
- 15) flores para miel,
- 16) consideraciones estéticas y ornamentales

Como se presenta en el Cuadro 2.4 los usos múltiples de los productos de especies forestales se pueden agrupar en alimentos, forraje, madera, suelo y misceláneos (86). Actualmente se realizan inventarios regionales, nacionales e internacionales de los sistemas agroforestales, su distribución depende de las condiciones ecológicas, agrológicas y socioeconómicas presentes (21, 25, 27, 28, 29, 33, 36, 38, 39, 43, 65, 82, 83, 86, 87, 106, 116, 122).

2.6. Especies en sistemas agroforestales (árboles asociados con cultivos)

2.6.1 Aspectos generales, ventajas

Como se indicó anteriormente, actualmente se realizan inventarios regionales, nacionales e internacionales de los sistemas agroforestales (43, 65, 86, 87). En este capítulo se presentan ejemplos de las asociaciones de árboles con cultivos agrícolas, especialmente dispersos en América Latina. La información es múltiple, en función de los objetivos de las metas de los estudios, cada investigador tiene un enfoque diferente. Ahora se presentarán las asociaciones descritas; no se consideran aquí los ejemplos en los cuales se tienen datos de producción o en los cuales se han desarrollado modelos para describir los ciclos de la materia orgánica del agua y de los elementos nutritivos.

Como un ejemplo de la distribución de las especies de sistemas agroforestales se resumen en el Cuadro 2.5 las especies arbóreas combinadas con bosques naturales, cafetales y pastos encontradas por Heuveldop y Espinoza (58) en Acosta y Puriscal, Costa Rica.

Cuadro 2.4. Productos utilizados de algunas especies potenciales de uso múltiple en sistemas agroforestales (según Nair, 86).

	Frutos, vainas	Semillas, nueces	Hortalizas	Aceite	Almidón	Espécies Condimentos	Hojas	Frutos, vainas	Brotos	Abejas	Leña	Carbón	Construcción	Herramientas	Aseo	Otros
<i>Acacia auriculiformis</i>														pulp.
<i>Calliandra calothyrsus</i>											
<i>Casuarina equisetifolia</i>												pulp.
<i>Derris indica</i>								
<i>Gliricidia sepium</i>											
<i>Leucaena leucocephala</i>									pulp.
<i>Mimosa scabrella</i>											..					pulp.
<i>Sesbania saman</i>	
<i>Sesbania bipinnosa</i>							..				.					pulp.
<i>Sesbania grandiflora</i>					pulp.

	Rompavientos	Cercos vivos	Conserv. suelo	Fijación dunas	N-Fijación	Materia orgánica	Cobertura	Otros	Ceras	Aceites esenciales	Taninos	Goma	Fibras	Medicinas	Cultural	Ornamental	Otros
<i>Acacia auriculiformis</i>								(T)	.				..	pulp.
<i>Calliandra calothyrsus</i>			
<i>Casuarina equisetifolia</i>						(T)	.					pulp.
<i>Derris indica</i>					
<i>Gliricidia sepium</i>											
<i>Leucaena leucocephala</i>											pulp.
<i>Mimosa scabrella</i>		pulp.
<i>Sesbania saman</i>					
<i>Sesbania bipinnosa</i>				pulp.
<i>Sesbania grandiflora</i>					(T)	.	.	.			pulp.

- Aceptable
- Bueno
- Excelente

Cuadro 2.5. Especies arbóreas en bosques naturales, cafetales y pastizales y su uso para madera y leña en Acosta y Puriscal, Costa Rica (según Heuveldop y Espinoza, 58) (orden alfabético).

ESPECIES		PRESENTES EN			USO	
Nombre latino	Nombre común	Bosques	Cafetales	Pastos	Madera	Leña
<i>Albizia adinocephala</i>	Gavilancillo	x	x			
<i>Anacardium excelsum</i>	Espavel	x			x	
<i>Bombacopsis quinatum</i>	Pochote	x	x		x	
<i>Brosimum alicastrum</i>	Jinocuabe	x			x	
<i>Bursera simaruba</i>	Indio desnudo	x	x			
<i>Byrsonima crassifolia</i>	Nance	x	x			x
<i>Cassia</i> spp.	Candelillo, vainilla	x	x	x		x
<i>Cecropia insignis</i>	Guarumo	x	x			
<i>Cedrela odorata</i>	Cedro	x	x	x	x	(x)
<i>Cordia alliodora</i>	Laurel	x	x		x	x
<i>Cordia purpurea</i>	Yupión	x	x			x
<i>Croton gossypifolius</i>	Targuá	x		x		x
<i>Cupania costaricensis</i>	Cascua	x	x			x
<i>Diphysa robinoides</i>	Guachipelfn	x	x	x		x
<i>Eugenia jambos</i>	Jambo, murta	x	x	x		x
<i>Ficus</i> spp.	Higuerón	x	x			
<i>Guazuma ulmifolia</i>	Guácimo	x	x			x
<i>Hymenaea courbaril</i>	Guapinol	x	x	x	x	x
<i>Inga</i> spp.	Cuajiniquil, guaba	x	x	x		x
<i>Luehea speciosa</i>	Guanábana	x				x
<i>Miconia argentea</i>	Purria	x	x	x		x
<i>Montonoa hibiscifolia</i>	Tobus	x	x			(x)
<i>Myrcia splendens</i>		x		x		
<i>Nectandra</i> spp.	Quizarrá	x	x		x	x
<i>Pithecellobium latifolium</i>	Ardilla	x			x	
<i>Rapanea</i> spp.	Ratón colorado	x	x	x		(x)
<i>Sapium</i> spp.	Jobo, jocote	x	x			
<i>Symphonia globulifera</i>	-----	x			x	
<i>Tabebuia chrysantha</i>	Roble	x	x		x	
<i>Tabebuia rosea</i>	Roble	x	x		x	
<i>Terminalia lucida</i>	Terminalia	x		x	x	
<i>Trichilia glabra</i>	Uruca	x	x		x	
<i>Vismia guianensis</i>	Achiotillo	x		x		
<i>Zanthoxylum elephantiasis</i>	Lagartillo	x	(x)			(x)
Totales		35	27	12	13	18
Porcentaje de todas las especies en el bosque natural		24,8	19,1	8,5	9,2	12,8

En los sistemas de café asociado con árboles de sombra de la región de Acosta y Puriscal en Costa Rica, sólo en raras excepciones, las especies arbóreas cumplen con la única función de generar sombra; generalmente se observa un uso múltiple de las especies de sombra.

Dos de las funciones más importantes de los árboles de sombra, son la producción de fruta y la de leña. Aquí se encuentran en primer lugar los cítricos (*C. sinensis*, *C. aurantifolia*, *C. grandis*, etc.), el mango (*Manifera indica*), el aguacate (*Persea americana*) y el ciruelo (*Spondias purpurea*).

Aún cuando algunos finqueros comercializan la fruta, en la mayoría de los casos la producción satisface el consumo de la familia y gran parte se desperdicia por dificultades de mercadeo.

Los diferentes tipos de Inga spp. son un caso especial, ya que aquí el énfasis está puesto en su función de producir sombra; sin embargo, constituyen una de las fuentes más importantes de leña para el pequeño agricultor. No en último lugar se encuentra su función de fijar nitrógeno, la cual es desconocida para muchos agricultores.

Erythrina spp. es quizás la única especie que no genera productos adicionales (aún cuando algunos agricultores la usan ocasionalmente como leña en los trapiches) y que cumple básicamente la función de generar sombra y mejorar el suelo, por su capacidad para integrar nitrógeno y el efecto de abono "mulch" que sus hojas generan sobre éste.

En la mayoría de los cafetales hay cercas vivas constituidas por árboles que suelen cumplir también las funciones enumeradas y otras como producir resultados (frutos, leña, producción de nuevas estacas, sombra y rompevientos), entre ellos se destacan Gliricidia sepium (madero negro), Diphysa robinoides (guachipelín), Bursera simarouba (indio desnudo o jinocuabe), Tabebuia rosea (roble de sabana) y Miconia argentea (Santa María). Una función importante la cumplen las cortinas cortavientos (Cupressus lusitanica, Cassuarina spp.) en la región de Acosta, donde los cafetales se ven fuertemente afectados por los vientos de verano.

La producción de madera valiosa está representada básicamente en los cafetales por Cedrela odorata, que se encuentra siempre presente en ambas regiones. Su frecuencia oscila entre 10 a 50 árboles por hectárea, con diámetros que van de 20 a 80 cm y alturas comerciales de 6m y más, a menudo con buena forma de fuste.

Gliricidia sepium y Diphysa robinoides son también dos de las especies más representadas y su madera es utilizada para bases de casas y postes de cerca por su gran resistencia a la intemperie.

En la Figura 2.2 se presentan algunas de las especies arbóreas y agrícolas comunes de los sistemas de producción agroforestales (49). Actualmente se realizan inventarios regionales y continentales de los sistemas agroforestales tradicionales; su distribución depende de las condiciones ecológicas, edáficas y de las costumbres regionales. Algunos de los sistemas agroforestales son sistemas muy antiguos, muchas veces tradicionales de agricultores. Su descripción y estudio son importantes a fin de generar nuevas tecnologías que puedan ser devueltas al campesino para que él trate de mejorar sus técnicas de explotación. Este gráfico no pretende ser una representación completa de las especies utilizadas en sistemas agroforestales en Costa Rica o de manera general en América Latina, se trata solo de un ejemplo.

ARBOLES

- M. CONSTRUCCION
- M. EXPORTACION
- M. LEÑA
- FRUTOS
- SOMBRA
- RESIDUOS DE "MULCH"

- BALSA
- CANELO
- CAOBA
- CEDRO
- CENICERO
- COCOBOLO
- GUANACASTE
- LAUREL
- PORO
- OCHROMA
- HECTRANDBRA
- SWIETENIA
- CEDRELA
- ALBIZZIA
- DALBERGIA
- ENTEROLOBIUM
- CORDIA
- ERYTHRINA
- ALNUS
- CUPRESSUS
- EUCALYPTUS
- GMELINA
- PINUS
- TERMINALLA
- LEUCAENA

CULTIVOS

- CEREALES: ARROZ, CEBADA, MAIZ, SORGO, MILLO
- TUBERCULOS: YUQUILLA, CAMOTE, YUCA
- TARO, ÑAME
- LEGUMBRES: JUDIA, GUANDU, FRIJOL
- ACETEROS: RICINO, SOYA, COCO
- PALMA ACEITERA, MANI
- FRUTALES: ARBOL DEL PAN, MARACUYA, BANANO, PAPAYA, MANGO, GUABA, GUAYABA, ZAPOTE, PEJIVALLE, AGUACATE, CITRICOS
- FIBRAS: CEIBA, SISAL
- ESPECIAS: PIMIENTA, CANELA, CLAVO, JENJIBRE, CARDAMOMO, CURCUMA
- ESTIMULANTES: CAFE, CACAO, TE, GUARANA, TABACO, COLA, MATE
- PASTOS: GRAMINEAS, LEGUMINOSAS
- MEDICINALES: CHINCHONA, PIRETRO
- OTROS: PALMA CATEGU, ACAJU, CAUCHO, BABASU

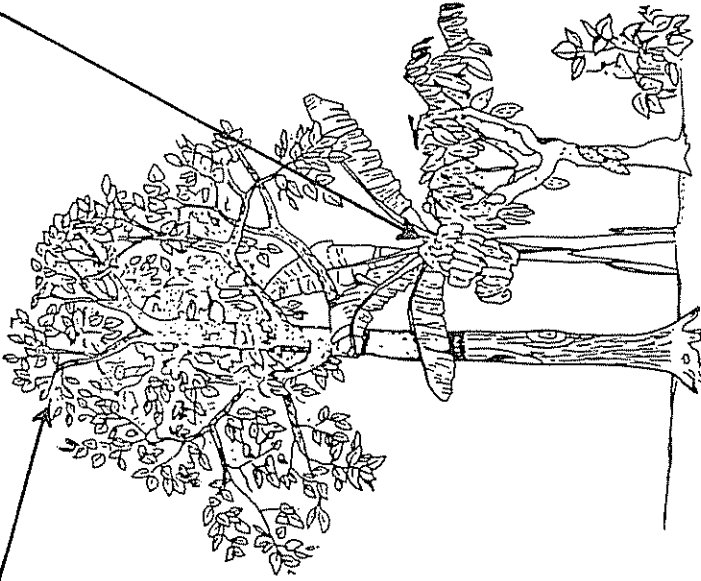


Figura 2.2. Algunas especies frecuentes en sistemas agroforestales (Fassbender, 49).

Los árboles utilizados son componentes muy importantes porque pueden ser fuentes de madera de construcción, madera de exportación y madera de leña. Generalmente la utilización de la madera no es la única razón de su utilización. Dentro del sistema existen cultivos umbrófilos que necesitan sombra, como el cacao y el café, en función de esto se tiene la utilización específica de árboles de sombra. En varios sistemas los árboles producen frutos que pueden ser utilizados en la alimentación. En función de los residuos de cobertura el suelo o "mulch" puede estar sirviendo para un control de la erosión en función de la cobertura del suelo y muchas veces sirven como fuente de elementos nutritivos, a través de los procesos ya mencionados.

Las especies arbóreas son a veces nativas o sea que tienen una distribución regional propia o a veces son exóticas, o sea, introducidas de otras regiones. Los cultivos han sido agrupados según sus productos en cereales, tubérculos, legumbres, aceiteros, frutales, fibras, especies, estimulantes pastos y otros.

También los sistemas agroforestales presentan una gran cantidad de ventajas y desventajas, desde el punto de vista biológico (22, 23, 24, 49, 86, 120, 121, 122). Entre los aspectos biológicos positivos se cuenta con los siguientes:

- Regulación de la radiación entre los diferentes estratos vegetales del sistema.
- Desarrollo de un gradiente de temperaturas, tanto en los componentes vegetales, como en el suelo.
- Regulación de la humedad relativa del aire.
- Disminución del efecto erosivo de las gotas de lluvia y disminución de la erosión.
- Limitación del efecto dañino del viento, regulación de la polinización y distribución de semillas.
- Disminución de la evaporación del agua del suelo.
- Mayor incremento de la productividad (biomasa, materia orgánica).
- Utilización adecuada del espacio vertical y del tiempo e imitación de patrones ecológicos naturales.

- Recirculación eficiente de los elementos nutritivos, especialmente por su extracción de los horizontes profundos del suelo.
- Mejoramiento de la capacidad de absorción del agua en el suelo por medio de cambios en la estructura del mismo.
- Los árboles leguminosos fijan cantidades importantes de nitrógeno.
- En algunas especies se desarrollan micorrizas para la mejor utilización de N y P.
- Desarrollo de una capa de mantillo ("mulch", cobertura muerta del suelo).
- Efectos benéficos debidos a simbiosis, alotropía, depredación, parasitismo y mutualismo.

Desde luego se tienen desventajas, entre las que se encuentran:

- Competencia de los árboles por la luz.
- Competencia de los árboles por nutrimentos.
- Competencia de los árboles por agua.
- Influencias alelopáticas.
- La explotación de los árboles puede causar daño.
- No hay período de descanso (con formación de barbechos).
- No hay, o se dificulta, la mecanización.
- La mayor humedad del aire puede favorecer enfermedades (especialmente hongos).
- Se puede favorecer una proliferación de animales dañinos.
- Puede haber una excesiva exportación de nutrimentos.

Estas ventajas y desventajas serán discutidas ampliamente en los capítulos siguientes de esta obra.

2.6.2 Árboles en rotaciones agrícolas (Sistema Taungya)

Los sistemas basados en plantaciones forestales asociadas con rotaciones de cultivos temporales con la finalidad de producción de madera en su etapa final, han sido descritos como sistemas de agrosilvicultura o sistema Taungya. El cultivo agrícola se limita a un corto período (de uno a cuatro años) hasta que los árboles plantados cierran su dosel.

Estos sistemas fueron originariamente desarrollados en el suroeste de Asia, especialmente en Tailandia; de donde viene etimológicamente la denominación: taung = colina y ya = cultivo, o sea cultivo de colinas (86).

Existen numerosas variaciones dentro de este sistema, las más importantes se refieren a la tenencia de las tierras y al beneficio de los productos (62, 86). En la Taungya departamental el servicio forestal es generalmente el dueño de la tierra, paga los costos de tala y roza del bosque primario y la plantación forestal; permite a sus obreros o a agricultores el uso de los suelos para los cultivos agrícolas, exigiendo el cuidado y mantenimiento de la plantación. En la Taungya tradicional el dueño de la tierra puede pagar a los obreros o permite recoger el producto agrícola exigiendo la limpieza de malezas en la plantación. Existe sin embargo, una serie de formas intermedias, en las relaciones propietario-campesino.

El sistema Taungya permite una mayor y mejor utilización del espacio, a la vez que reduce el costo y la limpieza inicial de las plantaciones cuando se compara con plantaciones establecidas sin agricultura. En la rotación agrícola-forestal se tiene una buena protección del suelo, se activa el ciclaje de la materia orgánica y de los elementos nutritivos, especialmente del nitrógeno si se usan leguminosas, aumenta las necesidades de mano de obra y permite a largo plazo un cambio de la agricultura migratoria en plantaciones forestales de alto valor. Para el éxito de este sistema se deben tener condiciones propicias de tenencia y área de las tierras, los agricultores deben ser conscientes de su trabajo "forestal", las cosechas implican exportaciones fuertes de elementos nutritivos (fertilización), se requiere capital, supervisión y condiciones favorables en las relaciones propietario-campesino.

En la literatura existen una gran cantidad de ejemplos sobre las experiencias con los sistemas agrosilviculturales o Taungya, especialmente en el sureste de Asia, el Pacífico (37, 86, 122) y Africa; aquí se han mencionado las siguientes especies arbóreas: Cupressus

lusitanica, Eucalyptus deglupta, Gmelina arborea, Pinus caribaea, Pinus khesiya, Pinus patula y Tectona grandis.

En América Latina existen antecedentes sobre sistemas Taungya, entre otros ejemplos, con las siguientes especies agrícolas y forestales (31, 33, 43, 74):

- Brasil con asociaciones de arroz, frijol, guaraná, maíz y cacao con Carapa guianensis, Cordia alliodora, Cordia goeldiana y Swietenia macrophylla
- Guatemala asociando rotaciones de camote, maíz, sandía y sorgo con Caesalpinia velutina, Cassia siamea, Gliricidia sepium, Guazuma ulmifolia, Leucaena glauca, Parkinsonia aculeata.
- Haití: calabaza, maíz, sandía y sorgo con Azadirachta indica, Cassia siamea, Casuarina equisetifolia, Eucalyptus camaldulensis, Leucaena spp., Parkinsonia acullata y Sesbania grandiflora.
- México con asociaciones de calabaza, maíz y frijol con Gmelina arborea, Pinus patula y Tectona grandis.

En el CATIE, Turrialba, Costa Rica se han conducido una serie de experimentos sobre los sistemas Taungya asociando (31, 33):

- Cultivos agrícolas: Coriandrum sativus (culantro), Cucumis sativus (pepino), Cucurbita maxima (ayote, zapayo), Manihot utilissima (yuca), Phaseolus vulgaris (frijol), Sechium edulis (ñame), Vigna unguiculata (caupí), Zea mays (maíz).
- Plantaciones forestales: Cordia alliodora, Cupressus lusitanica, Eucalyptus deglupta, Gmelina arborea, Pinus caribaea, Tectona grandis y Terminalia ivorensis.

Estos estudios generalmente se refieren a las primeras fases de establecimiento de los sistemas. El comportamiento de la plantación forestal a largo plazo hasta ahora ha sido poco estudiado.

En la agricultura migratoria de áreas tropicales y subtropicales se observan muchas veces combinaciones agroforestales basadas en la utilización de árboles o especies arbustivas combinadas con los cultivos de subsistencia. En los últimos años se registra una gran cantidad de trabajos que describen estas asociaciones (13, 36, 37, 38, 83, 92,

106, 116). De acuerdo con Padoch *et al* (92) y Unruh (116) las especies más frecuentes presentes en rotaciones agrícolas en la región amazónica son (en orden alfabético):

<u>Allagoptera</u> cf. <u>pesudocalyx</u>	Piacaba
<u>Alibertia</u> <u>edulis</u>	Marmelada (lisa)
<u>Alibertia</u> spp.	Marmelada do campo
<u>Anacardium</u> <u>occidentale</u>	Cashu
<u>Ananas</u> <u>comosus</u>	Piña
<u>Annona</u> <u>cherimola</u>	Anona
<u>Annona</u> <u>crassiflora</u>	Araticum
<u>Arachis</u> <u>hypogaea</u>	Maní
<u>Astocarpus</u> <u>incisa</u>	Panidilla
<u>Astocarpus</u> <u>integrifolia</u>	Jacá
<u>Astrocaryum</u> <u>chabira</u>	Chabira
<u>Astrocaryum</u> <u>huicungo</u>	Huicungo
<u>Astrocaryum</u> <u>tucuma</u>	Tucum
<u>Astrocaryum</u> <u>vulgare</u>	Tucuma
<u>Bertholletia</u> <u>excelsa</u>	Castaña del Pará
<u>Bixa</u> <u>orellana</u>	Achiote
<u>Byrsonima</u> <u>crassifolia</u>	Muruci
<u>Calocarpum</u> <u>mammosum</u>	Mamey, zapote
<u>Carica</u> <u>papaya</u>	Papaya
<u>Caryocar</u> <u>villosum</u>	Piqui
<u>Cedrela</u> <u>odorata</u>	Cedro (tropical)
<u>Celtis</u> spp.	
<u>Citrus</u> <u>aurantifolia</u>	Lima
<u>Citrus</u> <u>aurantium</u>	Naranja
<u>Citrus</u> <u>limon citratus</u>	Limón
<u>Citrus</u> <u>sinensis</u>	Naranja
<u>Cocos</u> <u>nucifera</u>	Coco
<u>Coffea</u> <u>arabica</u>	Café
<u>Cordia</u> spp.	Cereja Kayapó, laurel
<u>Crescentia</u> spp.	Calabaza
<u>Endopleura</u> <u>uchi</u>	Uxi
<u>Erythroxylon</u> <u>coca</u>	Coca
<u>Eugenia</u> <u>jambos</u> L.	Jambo
<u>Euterpe</u> spp.	Assai
<u>Genipa</u> <u>americana</u>	Genipapo
<u>Guilielma</u> <u>gasipaes</u>	Pejivalle
<u>Hancornia</u> <u>speciosa</u>	Mangaba
<u>Hymenaea</u> <u>courbaril</u>	Copal
<u>Inga</u> spp.	Guava
<u>Inga</u> spp.	Shimbillo
<u>Iriartea</u> spp.	Cashapona

<u>Iriarte</u> spp.	Cumala
<u>Iriarte</u> spp.	Huacra pona
<u>Jacaranda</u> spp.	Huamansamana
<u>Jessenia bataua</u>	Ungurahui
<u>Lecythis usitata</u>	Sapucaia
<u>Lonchocarpus</u> spp.	Barbasco
<u>Mangifera indica</u>	Mango
<u>Manilkara huberi</u>	Massaranduba
<u>Manilkara sapota</u>	Zapodilla
<u>Mauritia flexuosa</u>	Aguaje
<u>Mauritia martiana</u>	Buritirana
<u>Mauritia vinifera</u>	Buruti
<u>Maximiliana maripa</u>	Inaja
<u>Musa</u> spp.	Banana
<u>Musa</u> spp.	Plátano
<u>Ochroma</u> spp.	Balsa
<u>Oenocarpus bacaba</u>	Bacaba
<u>Olmedia</u> spp.	Llanchama
<u>Orbygnia martiana</u>	Babassu
<u>Parinari montana</u>	Uariri
<u>Persea americana</u>	Aguacate, palta
<u>Pimenta dioica</u>	Pimienta
<u>Phytelephas</u> spp.	Yarina
<u>Platonia insignis</u>	Bacuri
<u>Pouraqueiba sericea</u>	Umari
<u>Pourouma cecropiaefolia</u>	Uvilla
<u>Pouteria cainito</u>	Caimito
<u>Pouteria macrophylla</u>	Tuturuba
<u>Psidium</u> spp.	Guayaba
<u>Ravenata guyanensis</u>	Banana brava
<u>Rollinia mucosa</u>	Biribá
<u>Solanum</u> spp.	Cocona
<u>Spondias lutea</u>	Cajá
<u>Theobroma cacao</u>	Cacao
<u>Theobroma grandiflorum</u>	Capacu
<u>Theobroma bicolor</u>	Macambo

2.6.3 Árboles de madera comercial en cultivos

De acuerdo con el inventario de FAO (43) coinciden en la mayor parte de los países de América Latina en combinación con cultivos, la utilización de especies forestales maderables nativas de los géneros Cordia, Cedrela y Swietenia e introducidas de los géneros Gmelina, Eucalyptus y Pinus. La finalidad de las plantaciones y sus densidades

son muy variables.

En cada país y cada región se tienen características muy definidas de los sistemas. Así en México dentro de los desmontes, tradicionalmente el campesino mantiene algunos árboles con sus cultivos, con el fin de abastecerse de leña, carbón, postes para cerca, etc. Las especies forestales más comunes que ocurren son: Spondias mombin, Swietenia macrophylla, Cedrela odorata, Tabebuia rosea, Bursera simarouba, Scheelea liebmani, Ceiba pentandra, Cordia alliodora, Simarouba glauca, Manilkara sapota y Brosimum alicastrum. Los cultivos agrícolas manejados bajo esta condición son: maíz, frijol, arroz, caña de azúcar, calabaza, ají y plátano. En el altiplano es frecuente la combinación de maíz con especies de los géneros Cupressus, Fraxinus y Pinus, correspondiendo más que a un método agroforestal a un proceso de ampliación de frontera agrícola a expensas del bosque natural. Entre los pequeños propietarios del desierto chihuahuense existe la práctica de combinar Prosopis glandulosa, P. caeviana y Acacia farnesiana con cultivos de primavera-verano (maíz, frijol y sorgo) y cultivos de invierno (trigo, cebada y avena, 43).

Según Loján (74) en el Ecuador, los sistemas agroforestales (agricultura con árboles) están asociados a la pequeña propiedad rural, en la cual el uso principal es agrícola, pero se utilizan los árboles para demarcar propiedades, utilizándose madera, leña o alimentación. Las especies más comunes observadas en los sistemas son: eucalipto (Eucalyptus globulus), ciprés (Cupressus spp.), pino (Pinus spp.), capuli (Prunus capuli), guaba (Inga spp), chirimoya (Annona spp.), acacias (Acacia spp.), guayaba (Psidium guajaba), nogal (Juglans spp.), pomarosa (Eugenia jambos), cítricos (Citrus spp.). Así se tienen asociaciones en las cuales los árboles frutales juegan un papel importante.

En la región de Piauí, en el nororiente medio del Brasil, donde la palmera de babassu (Orbignya spp.) tiene una distribución natural (promedio 100 plantas. ha⁻¹) se han registrado las siguientes especies maderables en los sistemas agroforestales (77, en orden alfabético): Acacia spp., Acrocomia sclerocarpa, Astrocaryum vulgare, Cedrela odorata, Cecropia spp., Copernia prunifera, Euterpe oleacea, Inga spp., Mauritia flexuosa, Orbignya eichleri, O. phalerata, O. texeirana, Spondias mombin, Tabebuia spp.. Cada una de estas especies se utiliza específicamente y en forma muy diversificada.

Según Combe y Budowski (33) las especies maderables más importantes asociadas a los cultivos de café y cacao en Costa Rica, Colombia, Ecuador y Trinidad son: Alnus acuminata, Cedrela odorata, Cordia alliodora, Eucalyptus deglupta, Inga spp., Juqlans spp., Swietenia macrophylla.

El cacao (Theobroma cacao) es una especie típica umbrofflica, o sea que necesita sombra para su crecimiento óptimo. Martínez y Enríquez (76) diferencian las especies de sombra transitoria y permanente arbórea o frutícola. Dentro de las especies arbóreas se mencionan:

<u>Albizia spp.</u>	Albicia, lagarto
<u>Aleurites spp.</u>	Arbol de tung
<u>Anacardium excelsum</u>	Mijao
<u>Cedrella spp.</u>	Cedro rojo, amargo
<u>Cocos nucifera</u>	Coco
<u>Cordia alliodora</u>	Laurel
<u>Dalbergia spp.</u>	Cocobolo
<u>Erythrina spp. (fusca, glauca poeppigiana, velutina)</u>	Poró, bucare
<u>Hevea brasiliensis</u>	Caucho, hule
<u>Inga edulis</u>	Guaba, guamo
<u>Pithecellobium saman</u>	Samán
<u>Terminalia ivorensis</u>	Terminalia
y las siguientes palmeras:	
<u>Astrocaryum spp.</u>	Tucum, chambire
<u>Bactris gasipaes</u>	Pejibaye, chontaduro
<u>pupunha</u>	
<u>Euterpe oleracea</u>	Acai
<u>Jessenia spp.</u>	Seje
<u>Mauritia flexuosa</u>	Burití, moriche
<u>Orbignya martiana</u>	Babacu, taparo

Según Mussak y Laarmann (83) las especies arbustivas más comunes usadas como sombra del café y cacao en las regiones costeras del Ecuador son (en orden alfabético):

<u>Albizia quachapele</u>	Guachapelín
<u>Anacardium excelsum</u>	Marañón
<u>Beilshmieda alliophyla</u>	Jigua
<u>Cedrela odorata</u>	Cedro
<u>Cordia alliodora</u>	Laurel
<u>Chlorophora tinctoria</u>	Moral fino
<u>Erythrina fusca</u>	Palo prieto

<u>Erythrina poeppigiana</u>	Tambor
<u>Ochroma pyramidele</u>	Balsa
<u>Persea rigens</u>	Amarillo
<u>Pithecellobium saman</u>	Samán
<u>Schizolobium parahybum</u>	Pachaco
<u>Tabebuia chrysantha</u>	Guayacán
<u>Tectona grandis</u>	Teca
<u>Vitex spp.</u>	Pechiche

2.6.4. Árboles frutales asociados con cultivos

Las asociaciones de árboles frutales con cultivos anuales, bianuales y permanentes son muy típicas en zonas tropicales, tanto húmedas como semiáridas y áridas. Las diferentes especies arbóreas utilizadas generalmente además de los frutos producen, madera, leña y tienen muchas veces una función ornamental. Generalmente los frutos se consumen localmente, en la finca o se venden en el mercado más próximo.

En América Latina estos sistemas son muy diversos y variados. De la lista de árboles frutales presentados anteriormente, casi todas las especies se encuentran en asociaciones forestales. Muchas veces los sistemas involucran varias especies frutales, las cuales permiten una distribución estacional favorable para la nutrición humana.

En capítulos anteriores se han comentado los árboles frutales dispersos en sistemas agroforestales de la región de Acosta y Puriscal en Costa Rica (58).

En México, también es habitual el combinar maíz, frijol, calabaza y otros cultivos con plantaciones de frutales. Las especies más importantes son: Citrus spp., Carica papaya, Manifera indica, Persea americana, Manilkara sapota, Crysophyllum cainito, Byrsonima crassifolia y Anacardium occidentale (43).

De acuerdo con Hecht (57) los siguientes árboles frutales son los más frecuentes en la amazonia ecuatoriana y generalmente se encuentran asociados a cultivos:

<u>Annona muricata</u>	Guanábana
<u>Annona squamosa</u>	Anona
<u>Artocarpus altilis</u>	Arbol de pan
<u>Calocarpum sapota</u>	Zapote
<u>Caryodendron orinocensa</u>	Maní de árbol
<u>Citrus limettoides</u>	Lima

<u>Citrus limonia</u>	Limón mandarina
<u>Citrus sinensis</u>	Naranja criolla
<u>Guilielma gasipaes</u>	Chontaduro
<u>Inga densiflora</u>	Guaba común
<u>Inga edulis</u>	Guaba ilta
<u>Inga spectabilis</u>	Guaba machetona
<u>Persea americana</u>	Aguacate
<u>Pourouma cecropiaefolia</u>	Uvilla
<u>Pouteria cainito</u>	Abiyu
<u>Psidium quaiava</u>	Guayaba
<u>Theobroma bicolor</u>	Cacao blanco

De acuerdo con Martínez y Enríquez las especies frutícolas más frecuentemente utilizadas en asociación con el cultivo del cacao son (76):

<u>Anacardium occidentale</u>	Marañón, caju
<u>Annona spp.</u>	Guanábana, chirimoya, anona
<u>Artocarpus comunis</u>	Arbol de pan
<u>Bertholletia spp.</u>	Castaña de Para
<u>Carica papaya</u>	Papaya
<u>Citrus spp.</u>	Naranja, limón
<u>Eugenia jambos</u>	Pomarrosa, manzana rosa
<u>Jatropha curcas</u>	Piñón de indias
<u>Lucuma mamosa</u>	Zapote mamey
<u>Mangifera indica</u>	Mango
<u>Mammosum allocarpum</u>	Zapote
<u>Melia azederach</u>	Paraíso
<u>Musa spp.</u>	Banano, plátano
<u>Myristica fragans</u>	Nuez moscada
<u>Persea americana</u>	Aguacate, palta
<u>Pouteria sapota</u>	Zapote
<u>Pourouma cecropaefolia</u>	Uvilla
<u>Spondias spp.</u>	Ambarella
<u>Terminalia catappa</u>	Almendrón

Clement (30) indica que las palmeras son cultivos ideales para sistemas agroforestales por su copa abierta, su tallo erecto, fácil propagación y autopoda y producción múltiple (cosecha, palmito, etc.). Este autor informa sobre combinaciones favorables de palmas de pejibaye (Bactris gasipaes, chontaduro, pupunha) con los siguientes cultivos frutícolas en la amazonia brasileña y Costa Rica:

<u>Anacardium occidentale</u> ,	Marañón
<u>Annona muricata</u> ,	Graviola

<u>Artocarpus artilis</u> ,	Arbol del pan
<u>Artocarpus integrifolia</u> ,	Fruto de jack
<u>Cocos nucifera</u> ,	Coco
<u>Paullinia cupana</u> ,	Guaraná
<u>Pourouma cecreopiaefolia</u> ,	Uvilla
<u>Rollinia mucosa</u> ,	Biribí
<u>Theobroma grandifolium</u> ,	Cupuassu

El coco (Cocos nucifera) tiene también una distribución muy amplia en sistemas agroforestales: de acuerdo con Nair (84, 86) en el suroeste de Asia se combina con cultivos anuales y perennes como (en orden alfabético):

<u>Amorphophallus companulatus</u> ,	Taro asiático
<u>Coleus barbatus</u> ,	Papa china
<u>Curcuma longa</u> ,	Zapallo
<u>Dioscorea alata</u> ,	Ñame
<u>Dioscorea esculenta</u> ,	Ñame
<u>Ipomea batatas</u> ,	Camote
<u>Manihot utilissima</u> ,	Yuca
<u>Zingiber officinale</u> ,	Jengibre

2.6.5. Árboles de sombra en cultivos

El cultivo del café y del cacao con árboles de sombra es tradicional en América Latina. Con el cultivo de café a plena exposición solar se logran cosechas más altas, pero las necesidades ecológicas son más elevadas, especialmente la fertilización. La distancia de plantación de árboles de sombra para ambos cultivos, varía entre especies; cuando se trata de leguminosas generalmente se siembra en cuadro entre ocho y 12 m. Las ventajas de la sombra para el café (26) y el cacao (76) han sido descritas en la literatura específica.

La utilización de árboles de sombra es común para otras especies agrícolas y diversas especies y condimentos como pimienta, (Piper nigrum), vainilla (Vanilla planifolia), cardamomo (Elettaria cardamomum).

Las especies más utilizadas para sombra permanente de café y cacao pertenecen a los géneros Acacia, Albizia, Erythrina, Inga y Leucaena, tratándose de leguminosas que además de la reducción de la intensidad lumínica fijan nitrógeno en el suelo y apartan cantidades notables de residuos vegetales naturales o por podas como material de cobertura. Otros géneros como Calliandra, Ficus, Grevillea, Gliricidia,

Jacaranda, Mimosa, son de uso más restringido.

La sombra baja o temporal al establecer una plantación nueva se utiliza para producción agrícola o para proteger al suelo. En el caso de cacao, Martínez y Enríquez (76) mencionan las siguientes especies:

<u>Cajanus indicus</u> ,	Guandú, frijol de palo
<u>Colocasia esculenta</u> ,	Malanga
<u>Carica papaya</u> ,	Papaya
<u>Canavalia spp.</u> ,	Haba de caballo
<u>Flemingia vestita</u>	
<u>Leucaena glauca</u> ,	Leucaena
<u>Manihot esculenta</u> ,	Yuca
<u>Musa spp.</u> ,	Banano
<u>Ricinus comunis</u> ,	Ricino
<u>Tephrosia vogelli</u>	
<u>Zea mays</u> ,	Maíz

Como sombra transitoria para el café, Carvajal (26) menciona además como especies transitorias: Crotalaria alata (crotalaria), Crotalaria juncea (crotalaria), Sesbania punctata (sesbania), Tephrosia candida (tefrosia).

En Colombia las especies más utilizadas para la sombra del café son: Inga spp., Erythrina spp., Albizia carbonaria, Cedrela odorata, Cordia alliodora, Calliandra lehemania y Cassia spp. (43). Para el cacao se utilizan como árboles de sombra, además, las siguientes especies: Gliricidia sepium, Pithecellobium saman, Enterolobium spp., Tabebuia rosea y Terminalia ivorensis (43).

En México se utilizan aproximadamente 45 especies de sombra para café, cacao y condimentos. Para el café en los cultivos rústicos y tradicionales se usan: Aspidoderma megalocarpus, Bernoullia flamea, Brosiun alicastrum, Diabium quianensis, Dendropana arboreus, Calophyllum brasiliense, Ficus spp., Hymenaea courbaril, Sterculia mexicana, Swietenia panamensis, Terminalia amazónica, Talauma mexicana, Vochysia hondurensis. En el sistema de plantaciones del café se emplea preferentemente el género Inga (43).

Escalante (41) menciona que los cultivos antiguos tradicionales de café en Venezuela, pertenecen a la variedad "típica"; los nuevos pertenecen a las variedades "Bourbon", "Caturra", "Nuevo mundo" y "Siempre flores". El café generalmente lo cultivan los agricultores pequeños en asociaciones con cultivos frutícolas (bananas, cítricos,

aguacate), de sombra (Inga spp., Erythrina spp.) y maderables (Anacardium excelsum, Cordia alliodora, Cedrela spp., Terminalia spp.).

2.6.6. Cercas vivas, cortinas y rompevientos y cultivos en fajas ("alley cropping")

El uso de árboles como postes vivos para cercas es una técnica de amplia difusión en el sector rural americano. Alrededor de muchos cultivos agrícolas y pastizales se pueden observar cercas vivas. Su uso es múltiple, ya que además de la limitación de la finca, la madera producida se usa para leña, carbón, postes y a veces para aserrío; al podar los brotes se logra material de cobertura del suelo y para la alimentación del ganado. De acuerdo con Budowski (24) las cercas vivas presentan además ventajas sobre las cercas muertas en relación con los costos, durabilidad, productos adicionales económicos y especialmente sobre la fertilidad del suelo (producción de materia orgánica, fijación de nitrógeno, control de la erosión) y regulación de la fauna. Sin embargo, presentan desventajas en el mantenimiento, competencia por agua, nutrimentos, luz con cultivos vecinos y posibles alelopatías nocivas.

El empleo de cercas vivas es una actividad tradicional en muchas regiones colombianas (Llanos orientales, Valle del Cauca, zonas secas costeras del Atlántico, etc.), ya que cumplen funciones múltiples mediante el uso de forrajeras (Gliricidia sepium, Leucaena leucocephala, Fraxinus chinensis, etc.); maderables (Tabebuia rosea, Cedrela odorata, Cupressus lusitanica, Tectona grandis, Cordia alliodora); frutales (Mangifera indica, Spondias mombin, Eugenia jambos); y ornamentales (Spatodea campanulata, Delonix regia, Euphorbia spp.). El empleo de todas estas especies, o la mayoría de ellas, para la producción de leña se agrega, además a sus funciones de barreras rompevientos, albergue de especies faunísticas y atractivos paisajísticos (43).

Las especies más difundidas en el uso de cercas vivas en las regiones tropicales de México son: Gliricidia sepium (cocoite) y Bursera simaruba (chaca o palo mulato). Otras especies menos frecuentes son: Tabebuia rosea (maculis), Metopium brownei (chechén negro), Haematoxylum campechanum (palo tinto), Spondias mombin (jobo), Salix chilensis (sauce), etc.. En las zonas templadas se utilizan como cercas vivas las siguientes especies: Casuarina equisetifolia, Opuntia spp., Schinus molle, Cupressus spp., Juniperus spp., Agave spp., Fouquieria splendens, Phitecolobium dulcis, Populus spp. y Erythrina spp.. En las regiones más secas se utiliza como única especie para cerca viva la albarda cocotillo (Fouquieria splendens). Las especies

más usadas como cortinas rompevientos son: Casuarina equisetifolia, Eucalyptus spp., Cupressus lindleyi, Salix spp., Populus spp., Schinus molle, Fraxinus spp., Tamarix plumosa y Platanus spp. (43).

El estudio más completo de las especies de cercas vivas en América Latina es el de Sauer (100), quien encontró en Costa Rica el uso de 57 especies que regularmente son plantadas alrededor de cafetales, pastos y cañales. Las 25 especies más importantes descritas por Sauer fueron clasificadas de acuerdo con sus requisitos ecológicos, ellas son (en orden alfabético):

<u>Anacardium occidentale</u> ,	Espavel, marañón
<u>Bombacopsis quinata</u> ,	Pochote
<u>Bromelia pinquin</u> ,	Piñuela
<u>Bursera simaruba</u> ,	Indio pelado
<u>Byrsonima crassifolia</u> ,	Nance
<u>Caesalpinia eriostachys</u> ,	Saino
<u>Cassia grandis</u> ,	Sandal
<u>Casuarina equisetifolia</u> ,	Casuarina
<u>Croton nivens</u> ,	Copalchi
<u>Cupressus lusitanica</u> ,	Ciprés
<u>Diphysa robinoides</u> ,	Guachipelín
<u>Erythrina spp.</u> ,	Poró
<u>Eleagnus umbrellata</u> ,	Ua
<u>Euphorbia cotinifolia</u> ,	Barrabas, lechilla
<u>Ficus goldmanii</u> ,	Matapalo
<u>Ficus pertusa</u> ,	Matapalo
<u>Gliricidia sepium</u> ,	Madero negro
<u>Grevillea robusta</u> ,	Grevilea
<u>Inga spectabilis</u> ,	Guaba
<u>Phyllostachys bambusoides</u> ,	Bambú
<u>Salix humboltiana</u> ,	Sauce
<u>Spondias spp.</u> ,	Joco, jocote, ciruelo
<u>Synadenium grantii</u> ,	Bijarro
<u>Syzygium jambos</u> ,	Manzana rosa
<u>Tabebuia rosea</u> ,	Roble

Beer et al (17) han informado sobre las experiencias realizadas en Costa Rica y Nicaragua, en la plantación y el manejo de cercas vivas de Gliricidia sepium, Erythrina berteroana y Spondias purpurea.

En algunos estudios se han descrito cultivos en fajas o hileras, en los cuales se plantan árboles en líneas o grupos dentro de los cultivos, "alley cropping". Las especies arbóreas son generalmente de producción múltiple (madera, leña, estacas, forraje) y de servicios (sombra, materia orgánica, residuos de cobertura, fijación de nitrógeno). Sobre estas técnicas agroforestales existen experimentos en conducción en el IITA (Instituto Tropical de Agricultura, Ibadán, Nigeria) y el CATIE, Turrialba, Costa Rica (68, 69, 71, 72).

Kang et al consideran que estas técnicas pueden ser una alternativa para la agricultura migratoria en los trópicos húmedos (68) utilizando hileras de Leucaena leucocephala, Erythrina poeppigiana y Gliricidia sepium en cultivos se obtienen cosechas buenas y sostenidas de maíz, frijoles, yuca. También se hacen estudios de asociaciones con arroz y rotaciones maíz-frijol "cowpea". Torres (112) ha indicado que hileras de leucaena intercaladas con maíz contribuyen a mantener la producción del cultivo, producir leña y mejorar el nivel de materia orgánica y nitrógeno del suelo. Baggio y Heuveldop (12) encontraron en las condiciones del CATIE, Turrialba, Costa Rica, que el crecimiento inicial de Calliandra calothyrsus, una especie de la familia de las mimosas oriunda de México a Panamá, es muy favorable; la supervivencia y la producción de biomasa fueron altas.

En el CATIE también se conducen experimentos comparando el efecto de cultivos de hojas de Erythrina poeppigiana y Gliricidia sepium y de aplicación de fertilizantes naturales animales y material de cobertura ("mulch") sobre la producción de cultivos intercalados de maíz, frijoles, yuca.

2.6.7. Sistemas agroforestales múltiples

En las regiones tradicionales agroforestales generalmente se observan en las pequeñas fincas de los agricultores arreglos agroforestales múltiples. Ello implica que en pequeñas áreas se tiene una integración irregular de especies forestales, frutales y agrícolas con usos múltiples (producción, sombra, cercos vivos, leña, etc.). El arreglo espacial y temporal es complicado, resultando sin embargo, una regulación específica de las necesidades y de la mano de obra del campesino.

Los resultados de encuestas agroforestales realizadas en México (Cunduacán, Tabasco; 16) se resumen a continuación:

FINCA N°	1	5
SUPERFICIE	5 ha	8 ha
CULTIVOS	Cacao 3 ha Caña 1 ha Maíz y frijol 1 ha	Cacao 4 ha Caña 4 ha
ARBOLES DE SOMBRA	<u>Annona muricata</u> <u>Citrus sinensis</u> <u>Colubrina ferruginosa</u> <u>Diphysa robinoides</u> <u>Erythrina fusca</u> <u>Gliricidia sepium</u> <u>Mangifera indica</u> <u>Musa spp.</u> <u>Tamarindus indica</u>	<u>Colubrina ferruginosa</u> <u>Diphysa robinoides</u> <u>Erythrina fusca</u> <u>Gliricidia sepium</u> <u>Pithecolobium saman</u>
CERCAS VIVAS	<u>Diphysa robinoides</u> <u>Gliricidia sepium</u> (Zapote de agua)	<u>Diphysa robinoides</u> <u>Gliricidia sepium</u>
LEÑA	<u>Diphysa robinoides</u> <u>Erythrina spp.</u> <u>Gliricidia sepium</u>	<u>Chrysophyllum cainito</u> <u>Guazuma ulmifolia</u> (Franboyán)(Guatope)
MADERA DE CONSTRUCCION	<u>Colubrina ferruginosa</u> <u>Diphysa robinoides</u> <u>Gliricidia sepium</u>	<u>Colubrina ferruginosa</u> <u>Diphysa robinoides</u> <u>Gliricidia sepium</u>
ACAHUAL Y PLANTACION	NO	NO
HUERTO	Sí, varias especies	Sí, 41 especies

Las fincas estudiadas eran muy pobres en la diversificación de cultivos, sus propietarios garantizan la subsistencia de sus familias con las ventas de cacao y caña. La leña es la principal fuente de energía. Los árboles de sombra son en parte frutícolas, las frutas se consumen localmente. Las cercas vivas delimitan la propiedad y ofrecen servicios

de protección de los cultivos y del suelo.

De acuerdo con Padoch *et al* (92) la mayoría de los informes sobre sistemas agroforestales indígenas de la región amazónica han descrito formas utilizadas por grupos nativos casi exclusivamente para su subsistencia. Ellos describen sin embargo, un sistema agroforestal cíclico comercial empleado por agricultores mestizos en Tamshiyacu, Perú. Este sistema produce carbón, huertos anuales, semi-perennes y perennes para el consumo local y para el mercado regional. La venta de estos productos da un ingreso considerable a muchos agricultores. Los datos obtenidos demuestran que sistemas agroforestales amazónicos pueden tener valor comercial y servir de modelos eventuales para el desarrollo agrícola. Dentro de las especies vegetales de estos sistemas integrales agroforestales se involucran las siguientes:

1. Frutales

<u>Anacardium occidentale,</u>	Marañón
<u>Bactris gasipaes,</u>	Pejivalle
<u>Bertholletia excelsa,</u>	Nuez de Pará
<u>Chrysophyllum cainito,</u>	Caimito
<u>Inga edulis,</u>	Inga
<u>Pourouma cecropiaefolia,</u>	Uvilla
<u>Poraqueiba sericea,</u>	Umari

2. Cultivos agrícolas

<u>Ananas comosus,</u>	Piña
<u>Carica papaya,</u>	Papaya
<u>Manihot esculenta,</u>	Yuca, mandioca
<u>Musa paradisiaca,</u>	Plátano
<u>Oryza sativa,</u>	Arroz
<u>Passiflora mollissima,</u>	Tumbo
<u>Solanum sessiliflorum,</u>	Cocona

3. Productos animales

Venado, pecari, carne, cueros

4. Carbón

Diferentes especies

5. Fibras forestales

Astrocaryum chambira, Chambira
Heteropsis jenmani, Tamshi

6. Frutos forestales

Euterpe precatoria, Huasai
Jessenia bataua, Ungurahui
Mauritia flexuosa, Aguaje

7. Especies medicinales

Mandevilla scabra, Clavohuasca
Maytenus krukovii, Chuchuashi

Las especies arbóreas encontradas por Avila et al (10) en dos fincas en las cercanías de Turrialba, Costa Rica, en las que predominaban sistemas agroforestales integrados se resumen a continuación:

<u>Arboles</u>	Número de árboles	
	Finca 1	Finca 2
<u>Anthocephalus chinensis</u> , Cadam	43	---
<u>Araucaria</u> spp., araucaria	3	---
<u>Citrus</u> spp, cítricos	---	14
<u>Cordia alliodora</u> , laurel	30	15
<u>Eucalyptus</u> spp., eucalipto	125	3
<u>Psidium guajava</u> , guayaba	300	---
<u>Spathodea campanulata</u> , llama del bosque	---	1
<u>Syzygium malaccensis</u> , manzana de agua	---	1
<u>Arboles con café</u>		
<u>Cordia alliodora</u> , laurel	70	(20 con caña)
<u>Erythrina poeppigiana</u> , poró	sin contar	sin contar
<u>Eucalyptus</u> spp, eucalipto	90	---
<u>Pinus caribaea</u> , pino	25	

Cercas vivas

Gliricidia sepium,
madero negro

3 km

0.6 km

Bosque (número de árboles no contados)

Cedrela odorata, cedro
Cordia alliodora, laurel
Phoebe valeriana, quizarra
Rollinia mucosa, anonillo
Schizolobium parahybum,
gallinaza

La integración de especies en los sistemas agroforestales múltiples, frecuentes en el sector agropecuario latinoamericano, ha sido la base y el ejemplo para el establecimiento de unidades experimentales en diferentes países. Generalmente se trata de desarrollar sistemas de producción estables, rentables y de producción sostenida para pequeñas fincas.

Bishop (20) describe parcelas experimentales de 2 ha de tamaño en la región amazónica ecuatoriana en sistemas de producción de cultivos menores, porcinos y forestales, en los cuales se han integrado las siguientes especies (20, 27):

FRUTAS

<u>Ananas comosus</u> ,	Piña
<u>Passiflora edulis</u> ,	Granadilla
<u>Passiflora quadrangularis</u> ,	Badea
<u>Solanum tojiro</u> ,	Cocona

LEGUMINOSAS DE GRANO

<u>Arachis hypogaea</u> ,	Maní
<u>Canavalia ensiformis</u> ,	Haba blanca
<u>Phaseolus lunatus</u> ,	Tortas purutu
<u>Phaseolus vulgaris</u> ,	Quillu purutu
<u>Phaseolus vulgaris</u> ,	Yura purutu
<u>Vigna sesquipedalis</u> ,	Vainita
<u>Vigna sinensis</u> ,	Ucucha purutu

TUBERCULOS

<u>Caltathea allouia</u> ,	Pujin
<u>Dioscorea trifida</u> ,	Papa de sogá
<u>Pachyrhizus ahipa</u> ,	Ashipa

GRANOS

<u>Coix lachryma-jobi</u> ,	Trigo tropical
<u>Zea mays</u> , canguil,	Maíz

HORTALIZAS VARIAS

<u>Allium cepa</u> ,	Cebolla criolla
<u>Amaranthus spp.</u> ,	Cuchi col
<u>Cucurbita spp.</u> ,	Zapallo
<u>Cybanthera pedata</u> ,	Achocha
<u>Lycopersicon esculentum</u> ,	Tomate criollo
<u>Sacharum spp.</u> ,	Caña de azúcar

PRODUCCION PORCINA-FORESTAL

<u>Canna edulis</u> ,	Achira
<u>Desmodium ovalifolium</u> ,	Ovalifolium
<u>Guiljelma gasipaes</u> ,	Chontaduro, pejibaye
<u>Inga edulis</u> ,	Guaba
<u>Jatropha curcas</u> ,	Piñón de Indias
<u>Musa acuminata</u> ,	
x <u>M. balbisiana</u> ABB,	Orito
Criollo x Hampshire,	Cerdas en maternidad

Por otro lado Chavelas (34) indica que en el campo experimental "San Felipe Bacalar" (Chetumal, México) se experimenta con un módulo para ser manejado a nivel familiar en el que se han incluido las siguientes especies:

ESPECIES FORESTALES

a) Maderables

<u>Cedrela odorata</u> , cedro	<u>Enterolobium</u>
	<u>cyclocarpum</u> , pich
<u>Cordia dodecandra</u> , ciricote	<u>Simarouba glauca</u> ,
	negrito

Pseudobombax ellipticum,
amapola
Swietenia macrophylla,
caoba

Swietenia humilis,
cóbano
Tabebuia rosea, maculis
Tectona grandis, teca

b) Construcciones rurales

Colobrina arborescens,
tatuán

c) Celulósicas

Acrocarpus fraxinifolius,
acrocarpus
Gmelina arborea, melina

ESPECIES FRUTALES

Ananas spp., piña
Annona muricata, guanábana
Citrus spp., limón

Citrus spp., naranja

Citrus spp., toronja
Cocos nucifera, coco
Manilkara sapota,
zapote
Musa spp. (Vars. macho,
enano, valery, manzano)
Persea americana (vars.
nochebuena gigante,
querétaro, mantequilla,
puntachata), aguacate
Psidium quajava,
guayaba

ESPECIES DE CONDIMENTOS

Bixa orellana, achiote

Lippia spp., orégano

Pimenta dioica, pimienta

ESPECIES AGRICOLAS ANUALES

Manihot esculenta,
yuca

Phaseolus vulgaris,
frijol

Xanthosoma spp., macal

Zea mays
(5 variedades), maíz

ESPECIES FORRAJERAS

a) Herbáceas

Estrella africana

Panicum maximum, guinea

Pennisetum purpureum, gigante

c) Arbustos

Chidocolus chayamansa
(yucateca y

y tabasqueña), chaya

Leucaena spp., guaje

En un trabajo reciente Stienen (106) ha descrito sistemas agroforestales múltiples utilizados en el noreste de México, especialmente de regiones semiáridas hasta semihúmedas. Las especies más arbustivas importantes registradas son las siguientes (en orden alfabético):

<u>Agave striata</u>	Agava, espadín
<u>Arundinaria gigantea</u>	Bambú
<u>Bambusa vulgaris</u>	Otate
<u>Carica papaya</u>	Papaya
<u>Carya illinoensis</u>	Nogal, pecan, nuez de cáscara papel
<u>Carya mexicana</u>	Nuez criolla
<u>Casuarina equisetifolia</u>	Algarrobo
<u>Ceratonia siliqua</u>	Algarrobo
<u>Cnidioscolus chayamansa</u>	Chaya
<u>Cupressus sempervirens</u>	Cedro
<u>Eriobotrya japonicum</u>	Níspero
<u>Ficus carica</u>	Higuera
<u>Leucaena leucocephala</u>	Tepeguaje, guaje
<u>Malus domestica</u>	Manzano
<u>Melia azedarach</u>	Canelo
<u>Morus alba</u>	Mora blanca y m. negra
<u>Musa sapientum</u>	Plátano
<u>Olea europea</u>	Olivo
<u>Opuntia spp.</u>	Nopal
<u>Persea americana</u>	Aguacate
<u>Phoenix dactylifera</u>	Palma datilera
<u>Pirus domestica</u>	Pera
<u>Prunus amygdalus</u>	Almendro
<u>Prunus persica</u>	Durazno
<u>Psidium guajava</u>	Guayabo
<u>Punica granatum</u>	Granado
<u>Vitis vinifera</u>	Vid
<u>Yucca filifera</u>	Palma pita
<u>Yucca carnerosana</u>	samandoca

2.6.8 Huertos familiares

Los huertos familiares son sistemas tradicionales agroforestales múltiples que actualmente reciben una atención muy específica. Se trata de un complejo de plantas perennes o semiperennes que se encuentran en los alrededores de las casas de los finqueros o

agricultores integrando la producción agrícola (tubérculos, fibras, hortalizas, frutas, estimulantes), ganadera (animales menores, inclusive abejas) y forestal (madera, leña, postes) e incluye generalmente plantas medicinales y ornamentales. Estos sistemas son muy comunes en todos los países y regiones tropicales y subtropicales, su tamaño es generalmente pequeño, menor de 1 ha. En los diferentes países recibe nombres muy diferentes como "huerto casero", "huerto mixto", "patio", "solar", "homegarden".

De acuerdo con Gliessmann (54) las características más sobresalientes de los huertos familiares son:

1. Sistemas con necesidad de pocos ingresos y con capacidad constante de egresos para el consumo.
2. La distribución y demanda de mano de obra en forma escalonada durante todo el año y no concentrada en épocas cortas. Hay una mínima interferencia con otras actividades, dentro o fuera de la propiedad.
3. Se depende más de la mano de obra familiar; especialmente de la mujer y los niños.
4. Agroecosistemas con demandas económicas muy reducidas y apropiadas para personas con pocos recursos económicos.
5. Ecológicamente, es un sistema agrícola muy parecido a un ecosistema natural por su alta diversidad de especies, alta capacidad de captura de la radiación solar, mecanismos de control biológico, ciclos cerrados de nutrimentos, uso eficiente del espacio y alto grado de estabilidad.
6. Económicamente, es un sistema agrícola con mucha resistencia a fluctuación e inseguridad en el mercado por: a) seguridad contra la pérdida de un solo cultivo, b) seguridad de la producción de por lo menos los productos para las necesidades básicas, c) son sistemas de uso múltiple: medicinales, ornamentales, madera, leña, alimentación, modificación de ambiente, conservación de recursos naturales, etc. y d) seguridad de empleo en caso de pérdida de empleo fuera de la finca.

La investigación sobre huertos familiares se ha concentrado especialmente en el suroeste de Asia, especialmente en Tailandia, Malasia, Indonesia y Filipinas (19, 23, 39). Recientemente existen

algunas descripciones específicas de México y Costa Rica en América Latina.

De acuerdo con Boonkird et al (21) en los huertos caseros de Tailandia se cultivan especialmente maíz, yuca, cucurbitáceas y ají (chile, Capsicum frutescens). El número de especies agrícolas y forestales involucradas es muy elevado, incluyendo:

CULTIVOS

Allium cepa
Allium sativum
Colocasia antiquorum
Cucumis sativus
Cymopoqum citratus
Dolichos lab lab
Dioscorea spp.
Eleusine coracana
Foeniculum vulgare
Glycine max
Ipomea batatas
Luta acutanqula
Lycopersicon esculentum
Mentha arvensis
Phaseolus spp.
Psophocarpus tetragonobolus
Setaria italica
Solanum melongena
Trichosanthes cucumeria

ARBOLES

Anacardium occidentale
Eucalyptus camaldulensis
Hevea brasiliensis
Melia azedarach
Parkia javanica

En un estudio de 225 huertos familiares de Costa Rica, Price (95) ha mencionado las siguientes especies arbóreas (en orden alfabético):

Altura menor de 50 cm

<u>Aloe vera,</u>	Savila
<u>Anthurium crassinervium,</u>	Tabacón
<u>Apium graveolans,</u>	Apio
<u>Arachis hypogaea,</u>	Maní
<u>Arracacia xanthoriza,</u>	Arracacha
<u>Artemisia vulgaris,</u>	Ajenjo
<u>Benicassa hispida,</u>	Tonka
<u>Brassica juncea,</u>	Mostaza
<u>Brassica oleracea,</u>	Repollo

<u>Buddleia americana,</u>	Salvia
<u>Chrysanthemum parthenium,</u>	Altimisa
<u>Citrullus vulgaris,</u>	Sandía
<u>Coriandrum sativum,</u>	Culantro
<u>Crescentia cujete,</u>	Calabaza
<u>Cucurbita pepo,</u>	Ayote/Pipián/Chamo
<u>Cymopogon citratus,</u>	Zacate limón
<u>Daucus carota,</u>	Zanahoria
<u>Eryngium foetidum,</u>	Culantro coyote
<u>Fragaria vesca,</u>	Fresa
<u>Ipomea batatas,</u>	Camote
<u>Jacobinia tinctoria,</u>	Azul de mata
<u>Lactuca sativa,</u>	Lechuga
<u>Lippia alba,</u>	Juanilama
<u>Malva parviflora,</u>	Malva
<u>Maranta arundinacea,</u>	Arrowroot/Sagu
<u>Mentha citrata,</u>	Hierba buena
<u>Mentha spp.,</u>	Menta
<u>Monordia charantia,</u>	Sorosí
<u>Neurolaena lobata,</u>	Gavilana
<u>Nicotiana tabacum,</u>	Tabaco
<u>Ocimum basilicum,</u>	Albahaca
<u>Origanum vulgare,</u>	Orégano
<u>Oryza sativa,</u>	Arroz
<u>Pectis difusa Hook,</u>	Zacate Limón Francés
<u>Phaseolus lunatus,</u>	Frijol cubace
<u>Phaseolus vulgaris,</u>	Frijol común
<u>Raphanus sativus,</u>	Rábano
<u>Rosmarinus officinalis,</u>	Romero
<u>Ruta chalapensis,</u>	Ruda
<u>Sida rhombifolia,</u>	Escobilla
<u>Zingiber officinale Roscoe,</u>	Jengibre

Altura hasta 3 m

<u>Benicasa hispida,</u>	Tonka
<u>Bixa orellana,</u>	Achiote
<u>Cajanus cajan,</u>	Gandul/frijol de palo
<u>Capsicum annum,</u>	Chile dulce
<u>Capsicum frutescens,</u>	Chile picante
<u>Cassia reticulata,</u>	Saragundí
<u>Chenopodium ambrosoides,</u>	Apazote
<u>Coffea arabica,</u>	Café
<u>Colocasia esculenta,</u>	Malanga
<u>Cucumis sativus,</u>	Pepino

<u>Dioscorea</u> spp.,	Ñame
<u>Glycyrrhiza glabra</u> ,	Licorice
<u>Gossypium peruvianum</u> ,	Algodón
<u>Hibiscus rosa-sinensis</u> ,	Amapola
<u>Hyptis suaveolans</u> ,	Chan
<u>Jatropha gossypifolia</u> ,	Frailecillo
<u>Luffa cylindrica</u> ,	Paste/Estopa
<u>Lycopersicon esculentum</u> ,	Tomate
<u>Manihot esculenta</u> ,	Yuca
<u>Mirabilis jalapa</u> ,	Maravilla
<u>Passiflora quadrangularis</u> ,	Granadilla
<u>Plantago major</u> ,	Llantén
<u>Passiflora</u> spp.,	Estococo
<u>Polakowskia tabaco</u> ,	Tabaco
<u>Psychotria emetica</u> ,	Raicillo
<u>Saccharum officinarum</u> ,	Caña de azúcar
<u>Sambucus mexicana</u> ,	Sauco
<u>Sechium edule</u> ,	Chayote
<u>Solanum mammosum</u> ,	Pichichio
<u>Solanum tojiro</u> ,	Cocona
<u>Solanum quitioense</u> ,	Naranjilla
<u>Sorghum bicolor</u> ,	Sorgo
<u>Syzygium aromaticum</u> ,	Clavos
<u>Theobroma cacao</u> ,	Cacao
<u>Triticum aestivum</u> ,	Trigo
<u>Vigna</u> spp.,	Vainica
<u>Xanthosoma sagittifolium</u> ,	Tiquisque
<u>Xanthosoma</u> spp.,	Ñampi
<u>Zea mays</u> ,	Maíz
Cereza silvestre	
Cojombro	
Gotasamargas	
Vaquinary	
Zorrillo	

Altura hasta 15 m

Almendra,	<u>Terminalia catappa</u>
Anona,	<u>Annona reticulata</u>
Anonillo	
Aceituno,	<u>Simarouba glauca</u>
Achiotillo,	<u>Vismia guianensis</u>
Arco,	<u>Myrospermum frutescens</u>
Balsa,	<u>Ochroma pyramidalis</u>
Bambú,	<u>Bambusa</u> spp.

Caimito,	<u>Chrysophyllum cainito</u>
Canelo,	<u>Nectandra salicifolia</u>
Canjel,	<u>Citrus spp.</u>
Canilla de mula	
Carao,	<u>Cassia grandis</u>
Carambola,	<u>Averrhoa carambola</u>
Cas,	<u>Psidium friedrichsthalianum</u>
Castaño,	<u>Castanea sativa</u>
Cocobolo,	<u>Dalbergia retusa</u>
Cortés, amarillo,	<u>Tabebuia chrysantha</u>
Coyol,	<u>Acrocomia vinifera</u>
Chicasquil,	<u>Jatropha multifida</u>
Cuajiniquil,	<u>Inga spp.</u>
Cucaracha,	<u>Billia colombiana</u>
Durazno,	<u>Prunus persica</u>
Fruta de pan,	<u>Artocarpus cummunis</u>
Grosella,	<u>Phyllanthus acidus</u>
Guacalito	
Guachipelln,	<u>Diphysa robinoides</u>
Guácimo,	<u>Guazuma ulmifolia</u>
Guanábana,	<u>Annona muricata</u>
Guaitil,	<u>Genipa spp.</u>
Guapinol,	<u>Hymenaea courbaril</u>
Guarumo,	<u>Cecropia spp.</u>
Guava,	<u>Inga spp.</u>
Guayabo,	<u>Psidium quaiava</u>
Güitite,	<u>Acnistus arborescens</u>
Higuerilla,	<u>Ricinus communis</u>
Hoja sen,	<u>Caesalpinia pulcherrima</u>
Hombre grande,	<u>Quassia amara</u>
Huevos de caballo,	<u>Stemmadenia glabra</u>
Indio desnudo,	<u>Bursera simaruba</u>
Itabo	<u>Yucca elephatipes</u>
Jamaica,	<u>Pimenta officinalesardilla,</u>
Jícaro,	<u>Crescentia cujete</u>
Jocote,	<u>Spondias purpurea</u>
Lagartillo,	<u>Zanthozylum spp.</u>
Limón dulce,	<u>Citrus limeta</u>
Limón ácido,	<u>Citrus aurantifolia</u>
Limón cidra,	<u>Citrus medica</u>
Limón mandarina,	<u>Citrus spp.</u>
Madero negro,	<u>Gliricidia sepium</u>
Madroño,	<u>Calycophyllum candidissimum</u>
Malinche,	<u>Caesalpinia pulcherría</u>
Mamón,	<u>Meliocca bijuga</u>

Mamón chino,	<u>Nephelium lappaceum</u>
Mandarina,	<u>Citrus reticulata</u>
Mangle,	<u>Conocarpus erecta</u>
Manzana pera	
Marañón,	<u>Anacardium occidentale</u>
Mimbro,	<u>Averrhoa bilimbi</u>
Molidero,	<u>Psidium rensanianum</u>
Mora,	<u>Chlorophora tinctoria</u>
Muñeco,	<u>Cordia nitida</u>
Murta/mirto,	<u>Calytranthes costarricensis</u>
Nance,	<u>Byrsonima crassifolia</u>
Naranja agria	<u>Citrus aurantium,</u>
Naranja dulce	<u>Citrus sinensis</u>
Níspero,	<u>Achras sapota</u>
Nuez moscada,	<u>Myristica fragrans</u>
Papaturro,	<u>Coccoloba spp.</u>
Papaya,	<u>Carica papaya</u>
Papaya del monte,	<u>Carica peltata</u>
Pico de pájaro,	<u>Cassia occidentalis</u>
Pitanga/cereza,	<u>Eugenia uniflora</u>
Pejibaye,	<u>Guilielma utilis</u>
Poró,	<u>Erythrina spp.</u>
Quinacola	
Raspa guacal,	<u>Crescenthia alata</u>
Ratón,	<u>Rapanea ferruginea</u>
Soncuya,	<u>Annona purpurea</u>
Sonzapote,	<u>Licania platypus</u>
Tamarindo,	<u>Tamarindus indica</u>
Targuá,	<u>Croton spp.</u>
Tibilote/jiguilote,	<u>Cordia alba</u>
Tololo	
Toreta,	<u>Annona boloseriacea</u>
Toronja,	<u>Citrus grandis</u>
Tuna,	<u>Nopalea cochinellifera</u>
Yuplón,	<u>Spondias cytherea</u>
Zapote,	<u>Pouteria sapota</u>
Zapotillo,	<u>Pouteria spp.</u>

Altura hasta 30 m.

Aguacate,	<u>Persea americana</u>
Ardilla,	<u>Pithecelobium arboreum</u>
Cedro amargo,	<u>Cedrela mexicana</u>
Ceiba,	<u>Ceiba pentandra</u>
Ciprés,	<u>Cupressus lusitanica</u>

Coco,	<u>Cocos nucifera</u>
Corozo/palma real	<u>Scheelea costarricensis</u> ,
Espavel,	<u>Anacardium excelsum</u>
Eucalipto,	<u>Eucalyptus spp.</u>
Gallinazo,	<u>Schizolobium parahybum</u>
Gavilán.	<u>Albizia spp.</u>
Guácimo, molenillo,	<u>Luehea candida</u>
Guanacaste,	<u>Enterolobium cyclocarpum</u>
Higuerón,	<u>Ficus spp.</u>
Jabillo,	<u>Hura crepitans</u>
Jobo,	<u>Spondias mombin</u>
Laurel,	<u>Cordia alliodora</u>
Mamey,	<u>Mammea americana</u>
Mango,	<u>Mangifera indica</u>
Manzana de agua,	<u>Eugenia malaccensis</u>
Manzana rosa,	<u>Eugenia jambos</u>
Olosapo,	<u>Couepia polyandra</u>
Palma africana,	<u>Eleais guineensis</u>
Pino,	<u>Pinus spp.</u>
Pochote,	<u>Bombacopsis fendleri</u>
Poró,	<u>Erythrina spp.</u>
Quebracho,	<u>Lysiloma seemaii</u>
Roble sabana,	<u>Tabebuia rosea</u>
Teca,	<u>Tectona grandis</u>

2.7 Especies en sistemas silvopastoriles (árboles asociados con pastizales) y agrosilvopastoriles (árboles asociados con cultivos y pastizales)

2.7.1. Aspectos generales, ventajas

Los sistemas de producción silvopastoriles implican asociaciones de árboles en praderas, los agrosilvopastoriles integraciones de árboles y cultivos en praderas. Así este grupo de sistemas es muy complejo y múltiple diferenciándose (Cuadro 2.3; 32, 33):

- Pastoreo en plantaciones forestales o en bosques secundarios
- Árboles (maderables, forrajeros, frutales, de servicios) en pastizales
- Cercas vivas, cortinas rompevientos en pastizales

Estas combinaciones en el tiempo y/o en el espacio son igualmente múltiples y comúnmente practicadas por los pequeños agricultores. Los inventarios regionales o nacionales de estos sistemas no obstante, son escasos y se encuentran actualmente en su base de instrumentación.

En la agricultura migratoria se tienen dos fases típicas del desarrollo de sistemas silvopastoriles; después del uso agrícola se establecen praderas para pastoreo o al dejarse las parcelas en barbecho, sin uso agrícola, proliferan las praderas con bosques secundarios.

Los resultados obtenidos en un diagnóstico de 230 pequeñas fincas ganaderas de Costa Rica, obtenidas por Avila *et al* (10) se observan en el Cuadro 2.6.

Cuadro 2.6. Sistemas silvopastoriles y agrosilvopastoriles en pequeñas fincas de Costa Rica (Avila *et al*, 10).

Sistema de Finca	Fincas		Fincas con componente forestal	
	Nº	%	Nº	%
Ganadería sola	55	24	9	4
Ganadería y cultivos anuales	23	10	7	3
Ganadería y cultivos perennes	85	37	18	8
Ganadería, cultivos anuales y perennes	67	29	20	9
TOTAL	230	100	54	24

En el mismo estudio Avila *et al* (10) encontraron que en 38 fincas estudiadas continuamente, el 84% de los agricultores usa especies forestales para cercas vivas o proveer sombra y alimentos en potreros; el 42% tiene café bajo sombra, es decir, usa árboles como la *Erythrina* spp.; el 32% posee bosque natural y el 8% tiene árboles con propósito ornamental. Por esta razón, las prácticas que involucran el uso de árboles a nivel de pequeños productores son comunes y merecen una evaluación similar a la aplicada a cualquier otra actividad de la finca.

Cuadro 2.7. Razones dadas por los productores para mantener el bosque en sus fincas (Avila et al, 10)

Razón	Respuesta del productor	
	Nº	%
Conservación de agua o madera	29	54
Falta de tiempo y capital	13	24
Extracción de postes, leña y madera	8	15
Area sin potencial agrícola	2	3,5
Prohibición legal	2	3,5
TOTAL	54	100

Varios autores han analizado las ventajas y desventajas de los sistemas silvopastoriles y agrosilvopastoriles (23, 32, 57, 97, 111). De acuerdo con Ruiz (97) las principales ventajas de la ganadería asociada con cultivos y/o bosques son:

- Dada la influencia física del componente forestal se reducen las temperaturas extremas lo que permite un mejor comportamiento de los cultivos y animales, aunque no necesariamente esto se traduce en mayor productividad animal.
- Se estimula el ciclo de renovación orgánica y fertilización al retornar al suelo hojas, frutos, ramas, rastrojos, heces y orina, al extraer los árboles nutrientes que normalmente quedan fuera del alcance del sistema radicular de los pastos. En el caso particular de árboles o arbustos leguminosos es lógico suponer que contribuirán nitrógeno al suelo, tanto por fijación de N atmosférico, como por sus hojas y ramas que caen naturalmente o son podadas.
- El efecto compactante que tiene el ganado sobre el suelo podría estar compensado por el efecto que las raíces de árboles tienen sobre la porosidad, capacidad de infiltración y aireación del suelo. Sin embargo, este punto requiere de comprobación.
- Un factor disuasivo del establecimiento de explotaciones forestales es que los primeros ingresos no ocurren sino hasta los dos años (leña) ó los cuatro años (postes, frutos). Es decir, no es posible obtener ingresos a corto plazo, un hecho de extrema importancia para el pequeño productor. Por lo

tanto, aún cuando se produzcan ingresos modestos al combinarla con cultivos y/o ganadería, esto mejoraría la rentabilidad inmediata del sistema y lo haría más probable de ser aceptado por el productor de escasos recursos económicos.

- La ganadería permite la utilización y control de pastos y malezas que compiten con el desarrollo de árboles juveniles. En el caso de árboles frutales o palmas, la labor de limpieza que hace el ganado sobre el pastizal, facilita la cosecha de los frutos.
- El pastoreo de la vegetación de cobertura reduce el riesgo de incendios.
- Prácticas de manejo de bosques artificiales, tales como drenajes y fertilización con fósforo, estimulan una mayor producción y mejor calidad de los forrajes.
- Los pequeños productores, con limitaciones de área, pueden llegar a producir en bosques alimentos de origen animal (leche, carne) sin sacrificar el área dedicada a cultivos. Se logra así una diversificación de insumos de mano de obra y la naturaleza de los productos del sistema de finca.
- Además de las ventajas directas ya mencionadas, es necesario citar que los productores pueden obtener beneficios económicos resultantes de la leña, postes, madera y forraje. Los tres últimos son de uso eventual para beneficio del componente ganadero.
- En el caso de asociaciones de ganadería con cultivos, la ventaja principal radica en que entre el 60 y 70% de la biomasa vegetal puede usarse en la alimentación del ganado sin causar competencia con la alimentación humana.
- La diversificación de las actividades productivas de la finca reduce el riesgo de catástrofes económicas, elemento esencial en los sistemas del pequeño productor.

Por otro lado, también es importante reconocer que hay desventajas inherentes a los sistemas agrosilvopastoriles. Los más sobresalientes son:

- En el caso de asociaciones con árboles, éstos compiten por la luz con los cultivos y pastos de estrato inferior y por lo tanto, pueden reducir los rendimientos y calidad de las plantas.
- También hay competencia por el agua. En el caso de lluvias marginales ésta competencia puede hacer imposible el uso de cultivos.
- La velocidad de caída de las gotas de agua (y el tamaño de éstas) de las copas a las plantas del estrato inferior puede causar daños a las flores y frutos de éstas. Este problema se reduce al usar algún cultivo de altura intermedia.
- Prácticas como cosechas mecanizadas de cultivos, henificación o ensilajes se ven dificultados por la interferencia de los árboles a menos que la plantación de éstos se planifique teniendo estos fines en mente, ya sea usando líneas simples o franjas.
- Los sistemas agrosilvopastoriles al no ser extraños al pequeño productor podrían ser considerados como sistemas de la gente pobre y así no ser aceptables en un ámbito más amplio. Otro más, los intentos para mejorarlos pudieren interpretarse como la búsqueda de medios para mantener el "status" de pobreza o subsistencia del pequeño productor.
- El grado de desconocimiento de técnicas agrosilvopastoriles y la falta de personal entrenado hace que el avance previsto se vea disminuido por escasez de recursos y por la complejidad del tema. La experimentación formal de estas combinaciones es compleja, no sólo desde el punto de vista práctico, sino también desde el biométrico y requiere de un compromiso a largo plazo que pocas instituciones están dispuestas a asumir.

2.7.2. Pastoreo o producción de forraje en plantaciones forestales o en bosques secundarios

Las revisiones de literatura más completas sobre este tema han sido publicadas por Combe y Budowski (33), FAO (43), Ruiz (97), y Torres (111). Además de la descripción de las combinaciones encontradas se hace hincapié en la medición de la productividad (forraje y leche o carne del ganado) y de la calidad del forraje producido.

En América Latina se encuentran los siguientes ejemplos (33, 97):

Región/país	Especie forestal		Esp. Forrajera Asociada
	Nombre científico	Nombre común	
Chile	<u>Pinus radiata</u>	Pino	Varias
Surinam	<u>Pinus caribaea</u>		<u>Panicum pilosum</u> <u>Paspalum conjugatum</u> <u>Imperata</u> spp. <u>Axonopus sokai</u>
Costa Rica	<u>Cordia alliodora</u>	Laurel	<u>Cynodon nlemfuensis</u>
	<u>Cedrela odorata</u>	Cedro	<u>Panicum</u> spp.
	<u>Eucalyptus deglupta</u>	Eucalipto	<u>Setaria sphaecelata</u>
	<u>Pinus caribaea</u>	Pino hondureño	<u>Melinis minutiflora</u> <u>Brachiaria mutica</u> y otras
Ecuador	<u>Eucalyptus globulus</u>	Eucalipto	<u>Pennisetum clandestinum</u>
Brasil	<u>Pinus caribaea</u>	Pino hondureño	<u>Panicum maximum</u> <u>Pennisetum clandestinum</u> <u>Brachiaria humidicola</u>
Venezuela	<u>Pinus caribaea</u>	Pino hondureño	Varias

De acuerdo con la información de FAO (43) en el delta del Paraná, Argentina, se pastorea en las plantaciones de álamo, a partir del cuarto año, cuando los árboles son más robustos y cuando, en invierno y primavera, se repone la pradera con Bromus unioloides, Trifolium spp y otros pastos. En Mendoza se pastora en las plantaciones de álamos después del segundo año con ovejas, aprovechando el denso tapiz del trébol blanco que se instala espontáneamente. También se combina álamo con alfalfa, haciendo coincidir la siembra de alfalfa con la plantación, utilizando la gramínea durante cuatro a cinco años. Esta combinación la practican tanto los productores pequeños o medianos como los grandes productores. En la provincia de Misiones, también en Argentina, se pastorea con novillos bajo plantaciones de coníferas, especialmente Pinus elliottii y P. taeda. Después del tercer o cuarto año se pastorea también en plantaciones de Eucalyptus spp., del noreste, para reducir el peligro de incendios (43).

En la región semiárida nordeste del Brasil, se manejan plantaciones de Eucalyptus camaldulensis y de Mimosa caesalpiniaefolia con pastoreo en pradera de "capin buffel" (Cenchrus ciliaris). A los tres años, la sobrevivencia de Eucalyptus y su crecimiento en altura son muy satisfactorios; en cambio, el capin se vió muy perjudicado por deficiencia de fósforo. En la misma región se conoce la asociación tradicional de Prosopis pallida (algarrobo) con palma forrajera, método empleado por pequeños y medianos propietarios que han podido sobrellevar los prolongados veranos con mucho menos dificultades para mantener su rebaño que aquellos que no aplican el sistema (43).

En el Estado de Yucatán, México, se suele introducir el ganado a las selvas secundarias en donde, junto con las especies vegetales del estrato herbáceo, ramonea los arbustos bajos y las ramas de árboles con capacidad forrajera arrancadas por el campesino, especialmente de Brosimum alicastrum (ramón). Las sabanas mexicanas mantienen entre las extensas áreas de pastizales, algunas especies del bosque secundario como Byrsonima crassifolia (nanche) y Crescentia alata (júcaro). En el Estado de Tabasco el ganado "pastorea" en áreas inundadas algunas especies acuáticas: lirio (Eichornia spp.) y popal (Talia spp.), localizándose, entre las áreas emergentes de terreno, comunidades arbóreas en que domina Haematoxylum campechianum (tinto), que también es ramoneado por el ganado (43).

Peñaloza et al (94) han descrito asociaciones de Pinus radiata para el pastoreo directo de ovejas en regiones litorales del sur de Chile, con grandes ventajas en la producción animal.

2.7.3. Árboles (maderables, forrajeros, frutales) asociados con pastizales

La información existente es muy escasa, especialmente sobre las combinaciones utilizadas. En el Cuadro 2.5 se han mencionado las especies arbóreas encontradas en los pastizales de la región de Acosta y Puriscal en Costa Rica. Del Cuadro 2.8 se desprende que las especies arbóreas encontradas en zonas secas de Costa Rica son específicas y que su uso es generalmente múltiple para forrajes, madera y leña, así como fuente de sombra y nutrición humana (16, 98).

Cuadro 2.8. Especies arbóreas encontradas en pastizales de la región Pacífico Seco de Costa Rica (Beer y Somarriba, 1961).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>Acrocomia vinifera</i> , palma coyol	X	X				X
<i>Anacardium occidentale</i> , marañón	X	X	X			
<i>Cassia grandis</i> , carao	X	X				
<i>Cedrela odorata</i> , cedro	X				X	
<i>Cordia alliodora</i> , laurel	X		X	X	X	
<i>Diphysa robinoides</i> , guachipelln	X		X	X	X	
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> , guanacaste	X			X	X	X
<i>Ficus</i> spp. higuaron	X				X	
<i>Gliricidia sepium</i> , madero negro	X		X	X	X	X
<i>Hymenaea courbaril</i> , guapinol	X			X	X	X
<i>Inga</i> spp. guavo	X	X		X	X	X
<i>Mangifera indica</i> , mango	X	X		X	X	X
<i>Persea americana</i> , aguacate	X	X		X	X	X
<i>Pithecolobium saman</i> , cenizaro	X			X	X	X
<i>Psidium guajava</i> , guayabo	X	X		X	X	X
<i>Scheelea rostrata</i> , palma real o corozo	X	X			X	X
<i>Schizolobium parahybum</i> , gallinazo	X					
<i>Spondias mombin</i> , jobo	X	X				X
<i>Spondias purpurea</i> , jocote	X	X	X			
<i>Tabebuia pentaphylla</i> , roble de sabana	X		X	X	X	

(1) Sombra (3) Cerca viva (5) Madera o postes
(2) Consumo humano (4) Leña (Preteridos) (6) Forraje

De acuerdo con Hecht (57) las especies arbóreas más frecuentes en los sistemas agropastoriles de la zona amazónica son (en orden alfabético): Acacia albida, Albizia lebbek, Brosimun alicastrum, Cassia spectabilis, Cajanus cajan, Desmantis virgatus, Enterolobium schomerikii, Leucaena leucocephala, Prosopis palida, Pithecellobium saman, Parkia spp., Selerolobium paniculatum, Stryphneoderdrum polcherrium y Sesbania grandiflora. Estas especies producen forraje y en algunos casos frutos comestibles, su madera se utiliza para construcciones o como leña.

Los árboles productores de forraje (frutos y hojas) más frecuentes en América Central son (en orden alfabético) (97):

<u>Brosimun alicastrum</u>	Masico, ojoche, feguó, guaimaro
<u>Brosimun galactodendrom</u>	
<u>Diospyros conazatti</u>	Ebano, zapote enano
<u>Diospyros rosei</u>	
<u>Diospyros sonora</u>	
<u>Diospyros</u> spp..	
<u>Ficus</u> spp..	Higuerón
<u>Guazuma ulmifolia</u>	Guácimo, caulote, bolaina
<u>Leucaena leucocephala</u>	
<u>Leucaena</u> spp..	
<u>Pithecellobium dulce</u>	
<u>Pithecellobium lobatum</u>	
<u>Pithecellobium jiringa</u>	
<u>Pithecellobium saman</u>	Mochiguiste, sínaso, guayacán blanco
<u>Prosopis juliflora</u>	Carbón, algarrobo, nacascal
<u>Prosopis tamarugo</u>	
<u>Prosopis</u> spp..	
<u>Psidium quajava</u>	Guayabo
<u>Spondias purpurea</u>	Jocote, ciruelo

En forma tradicional en la costa norte de Colombia (43) en especial en áreas semidesérticas de la península de la Guajira, se practican sistemas silvopastoriles con Lividivia coriari (dividivi) y Prosopis juliflora (trupillo), que son ramoneados por las cabras que sólo cuentan con ese alimento en las épocas secas. La población extrae, además, la leña de estas especies y de otras especies naturales, producto esencial en su sistema de vida. Lividivia produce frutos con alto contenido de tanino, que sirve de curtiente a los pobladores. En esta región, algunas escasas plantaciones de Leucaena leucocephala están demostrando buenos resultados para la producción de leña y de

forraje. Con el género Leucaena se viene estableciendo un ensayo de introducción de varias de sus especies en Urabá, para determinar sus rendimientos de forraje (materia verde) y leña. Entre los cinco ensayos (diversifolia, collinsii, var campina grande, var K 8, y esculenta), la variedad campina grande es la mayor productora de leña y la segunda en forraje.

Dos experiencias muy importantes se han desarrollado en Chile (43) sobre la base de plantaciones de árboles y arbustos forrajeros nativos de la zona desértica y de la zona semiárida del norte del país. El primer caso se refiere al Prosopis tamarugo, con el cual se plantaron en el decenio 1963-73 alrededor de 20 000 hectáreas (incluyendo un 10 por ciento de Prosopis chilensis: algarrobo), que han mantenido hatos ganaderos de bovinos, ovinos y caprinos, permitiendo desarrollar investigaciones completas sobre la factibilidad técnica y económica de someter al aprovechamiento económico un sector significativo del "desierto más seco del mundo", aprovechando las características del tamarugo de utilizar capas freáticas del subsuelo y de absorber humedad ambiental con su sistema foliar. La otra experiencia ha consistido en la repoblación con Atriplex spp., de extensas áreas paralelas a la costa nortina en donde la precipitación anual registra promedios entre 100 y 300 mm, con periodos secos de 10 y 11 meses al año. En los últimos años se plantaron unas 15 000 hectáreas, a raíz de la inclusión del sistema entre las especies bonificadas con el 75% del costo de la plantación. Finalmente, se ha venido ensayando la recuperación de la estepa con Acacia caven para su manejo silvopastoril.

En algunos estudios se ha hecho referencia a las asociaciones de frutales con pastos. Tanto en América Latina como en Asia se han descrito los efectos favorables del coco (Cocos nucifera) como fuente de sombra para el ganado que se encuentra pastando sobre Panicum maximum y Brachiaria humidicola (84, 85)

De acuerdo con Torres (111) las plantaciones de caucho (Hevea brasiliensis) también se pueden asociar favorablemente con pastos con o sin animales menores (aves).

Benavides (19) publicó originalmente los valores del Cuadro 2.9, sobre las características nutricionales de las hojas de diferentes especies arbóreas, especialmente frutícolas, utilizadas para alimentación de cabras en Costa Rica.

Cuadro 2.9. Características nutritivas de las hojas de especies arbóreas para alimentación de cabras (según Benavides, 20).

	% materia seca	% proteína cruda	% diges- tibilidad "in vitro"
<u>Acnistis arborescens</u> , gütite	12,5	22,9	74,2
<u>Anacardium occidentale</u> , marañón	36,6	10,9	16,2
<u>Bursera simaruba</u> , jinocuabe	35,0	14,5	32,1
<u>Cassia</u> spp., candelillo	37,5	17,8	23,1
<u>Citrus</u> spp., naranja dulce	36,7	14,2	76,4
<u>Crescentia alata</u> , jícar	36,9	9,8	43,8
<u>Erythrina berteroana</u> , poró	15,6	27,6	59,8
<u>Eugenia jambos</u> , manzana rosa	40,2	10,3	37,6
<u>Ficus</u> spp., higuerón	33,2	13,1	48,8
<u>Inga</u> spp., guaba extranjera	38,7	21,8	32,8
<u>Inga</u> spp., guaba criolla	41,2	20,1	27,5
<u>Lauraceae</u> , quizarrá	34,3	12,7	43,1
<u>Mangifera indica</u> , mango	46,8	8,7	37,0
<u>Persea americana</u> , aguacate	36,1	11,8	31,9
<u>Rapanea ferruginea</u> , ratón	29,3	16,9	36,6
<u>Roupala complicata</u> , zorrillo	16,4	33,7	68,8
<u>Sondias purpurea</u> , jocote	26,5	14,0	58,0

Somarriba ha indicado que la guayaba (Psidium guajava) tiene una amplia distribución en pastizales de Costa Rica y que los frutos pueden ser utilizados directamente para la nutrición animal (101, 102).

2.7.4. Cercas vivas y cortinas rompevientos en pastizales

Todos los aspectos tratados en el Capítulo 2.6 sobre las cercas vivas y las cortinas rompevientos asociadas con cultivos pueden aplicarse a sus asociaciones con pasturas. Por ello no es necesario entrar nuevamente en esos detalles.

Aquí solo es necesario destacar que estas asociaciones son fuentes muy importantes de forrajes y de ramoneo para animales, especialmente en las estaciones secas de las diferentes regiones.

2.7.5. Árboles fijadores de nitrógeno en pastizales

Gran parte de las especies arbóreas asociadas en pastizales pertenecen a la familia de las leguminosas, así como un manejo apropiado y a través de la fijación de nitrógeno son mejoradores del suelo. En Costa Rica existen buenas descripciones de las siguientes

asociaciones (97):

<u>Erythrina poeppigiana</u> , poró	<u>Panicum maximum</u>
<u>Gliricidia sepium</u> , madero negro	<u>Homolepis aturensis</u>
<u>Leucaena leucocephala</u> , leucaena	<u>Digitaria decumbens</u>
<u>Pithecellobium saman</u> , mochiguiste	<u>Paspalum fasciculatum</u>

En el Valle Central de Costa Rica se ha dado especial atención a sistemas silvopastoriles de jaúl (Alnus acuminata) con Axonopus scoparius (pasto imperial), Pennisetum clandestinum (pasto kikuyo) y Pennisetum purpureum (pasto elefante) (15, 32, 33, 98). En este caso a pesar de que el jaúl no es una leguminosa, desarrolla módulos en una simbiosis con Actinomyces alni, fijando cantidades notables de nitrógeno. El ganado aprovecha la sombra y logra aumentos extras de rendimiento con el pastoreo directo de las hojas de jaúl y del pasto con un mayor contenido en proteínas.

2.8 El modelaje de los sistemas agroforestales

2.8.1. Aspectos generales

Los sistemas agroforestales son lógicamente ecosistemas artificiales o agroecosistemas donde existen, características muy definidas en el uso de la tierra. Los sistemas agroforestales son manejados por el hombre mediante la selección de las especies productoras, el control de los organismos consumidores que compiten con él y en algún grado, el control de los factores abióticos; todo ello con miras a aumentar la cosecha, disminuir su variación en el tiempo y minimizar el insumo de sustancias químicas. El fundamento de estos sistemas se halla en el mejor aprovechamiento de los recursos en el espacio vertical, tanto aéreo como subterráneo.

La selección de especies que serán asociadas en un sistema agroforestal deberá ser cuidadosa, deben buscarse mutualismos y evitarse alelopatías o fuertes competencias. En los sistemas agroforestales el aspecto de la selección de especies es el que reviste mayor grado de manipulación. Los factores abióticos son por lo general poco manejables y entre estos, los factores edafológicos, son los que permiten un manejo más acentuado, por medio del desmonte, quema, roturación del suelo, encalado, fertilización, riego y drenaje. Los factores climáticos son de más difícil manipulación; aunque actualmente se conocen métodos para provocar lluvias. El viento es susceptible de algún control mediante la construcción de cortinas rompevientos. La radiación solar excesiva y las altas temperaturas foliares pueden ser atenuadas mediante árboles de sombra; en general antes del control de

los factores climáticos, la búsqueda está centrada en la selección de especies adaptadas y, cuando es posible, en la selección del período del año más favorable. Ciertos factores topográficos, como la pendiente, pueden ser modificados mediante la construcción de terrazas.

En los sistemas agroforestales, especialmente en los trópicos húmedos, el ciclo de la materia reviste vital importancia para mantener la fertilidad de los suelos. En estos sistemas, la exportación de materia por la cosecha es relativamente pequeña respecto a la biomasa total remanente, si se compara con la mayoría de los monocultivos. Las bases generales del modelaje de ecosistemas (Capítulo 1.3.3) y de agroecosistemas (Capítulo 2.2.4) es aplicable para describir adecuadamente a los sistemas de producción agroforestales.

2.8.2 Modelo de un sistema silvopastoril

Utilizando la simbología de Odum (89) se presenta en la Figura 2.3 un esquema simplificado de un sistema de producción silvopastoril. Dentro de los componentes bióticos se deben diferenciar a los productores primarios (pastos, malezas y árboles) y secundarios (animales). Los productos o fuentes de salida del sistema son específicos de los componentes, diferenciándose carne, leche, cueros y otros para los animales y la madera, residuos vegetales y otros para los árboles. Si se trata de árboles de uso múltiple el número de productos adicionales de estos árboles es muy variable (Ver Cap. 2.4.1). Como fuente de pérdida del sistema debe considerarse el calor que disipan tanto las plantas como los animales.

Las fuentes primarias de producción son la energía solar, el agua y los elementos nutritivos que son aprovechables por los componentes bióticos. Los insumos de producción son fuentes secundarias de ingresos al sistema. Aquí deben ser considerados la mano de obra, alimentación suplementaria, productos veterinarios, fertilizantes, insecticidas e herbicidas que se utilizan en el sistema. Su aplicación es bastante específica y se deben analizar para un sistema en descripción. El ingreso de animales al sistema depende del manejo del mismo (compra de animales pequeños para engorde, nacimiento de animales, etc.). El capital regula lógicamente al sistema, ya que él es manejado por el hombre, siendo así un sistema antropogénico.

En el sistema se observa una serie de transformaciones internas, especialmente del agua y de los elementos nutritivos. El retorno de materia orgánica y elementos nutritivos de los animales depende de su distribución y movilidad en la pradera y de la composición química de

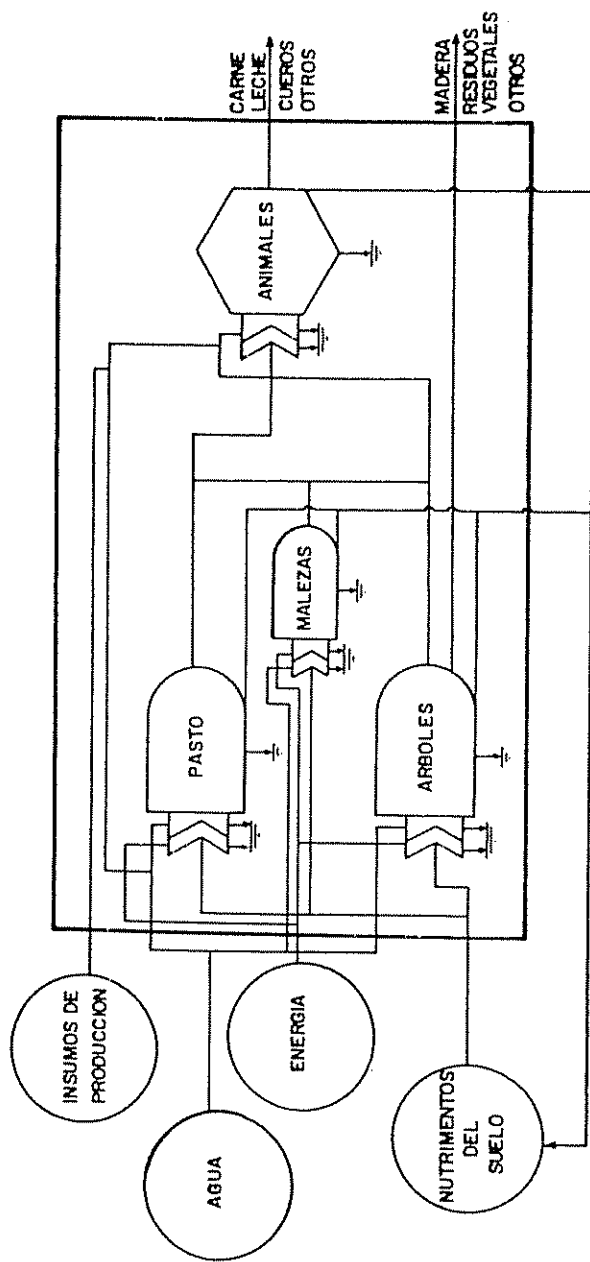


Figura 2.3. Modelo de la materia orgánica de un sistema silvopastoril con los símbolos de Odum (89) (preparado por el autor).

las excreciones (heces y orina). Los residuos vegetales (raíces de pastos, malezas y árboles, hojarasca de los árboles) son también importantes en estos ciclos. Con el fin de simplificar, no se han considerado los procesos de ingreso con el agua de lluvia, volatilización, fijación simbiótica de N, erosión, lixiviación de elementos nutritivos y agua, etc.

2.8.3. Modelo de un sistema agroforestal

En la Figura 2.4 se representa un sistema agroforestal del cacao, con poró como árbol de sombra que aporta nitrógeno y con plátano, que mantiene poblaciones de insectos útiles en la polinización del cacao: el modelo muestra los procesos involucrados en el ciclado de la materia y de los elementos nutritivos (48, 49). En la figura se observan los detalles de los sistemas como tales (componentes, límites, fuentes de entrada y salida, interacciones entre componentes) y se anotan las observaciones y mediciones necesarias para describir al sistema.

Los componentes del sistema se agrupan en abióticos como el suelo mineral (con sus diferentes horizontes) y la capa de mantillo (con los restos vegetales en descomposición) y los bióticos como las especies involucradas en la producción del sistema (con sus compartimentos: hojas, ramas, tallos, raíces, flores y frutos). Para simplificar no se han considerado los componentes bióticos faunísticos. La capa de mantillo es un eslabón entre los componentes bióticos y los componentes abióticos edáficos como el suelo, pues en los procesos de interacción, entre estos dos grupos de componentes se tiene la producción de residuos vegetales, naturales o por la poda de los árboles de sombra que caen sobre el suelo formando la hojarasca o mantillo que al ser descompuestos a través de los procesos de humificación y de mineralización liberan elementos nutritivos que pasan al suelo o se forman sustancias húmicas que se acumulan en el suelo: los minerales liberados son neutralizados o absorbidos nuevamente por las plantas y así se tiene un ciclo interno de elementos nutritivos.

Las fuentes de ingreso consideradas son la lluvia con los elementos químicos que ingresan al sistema con el agua. Como fuentes de egreso del sistema se consideran el agua de percolación con la cual pasan elementos nutritivos a la capa freática del suelo y las cosechas del sistema como frutas y leña. Como fuente de ingreso se consideran también la fertilización con diferentes elementos nutritivos y la fijación simbiótica del nitrógeno.

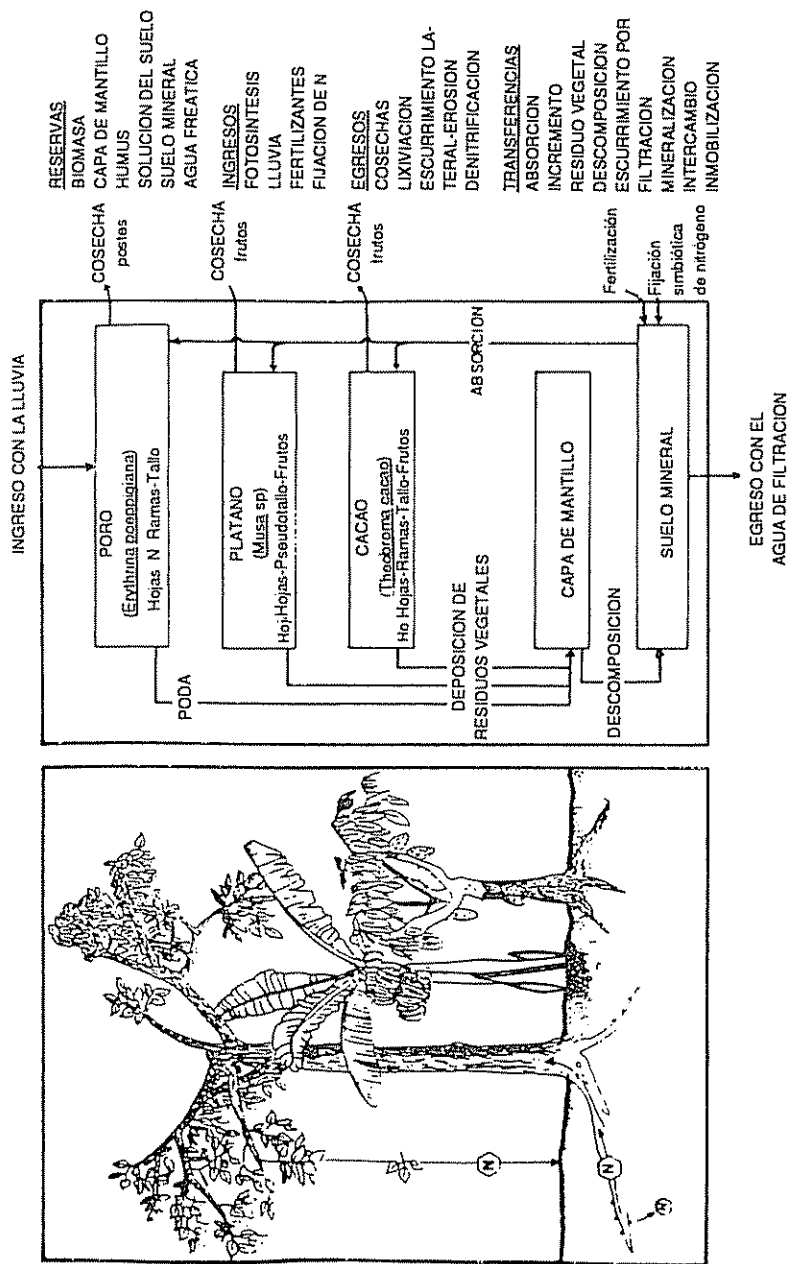


Figura 2.4. Representación esquemática de un sistema agroforestal de cacao-plátano-poró y el modelo de su materia orgánica y de los elementos nutritivos (según Fassbender, 49; ver también 48).

El desarrollo de estos modelos de sistemas agroforestales implica una integración de muchas ciencias como la dasonomía, agronomía, ganadería, edafología, y ecología, siendo necesaria una investigación multidisciplinaria para describir, profundizar, organizar y dirigir los sistemas de producción agroforestales (18, 49, 71, 86, 122). Lógicamente también se pueden desarrollar modelos sobre aspectos económicos y sociológicos. En los capítulos subsiguientes se hará hincapié en los "modelos edafológicos" de los sistemas agroforestales.

RESUMEN

- Se definen los sistemas de producción agroforestales y se presentan los criterios para su clasificación, dividiéndolos en agroforestales, agrosilvopastoriles y silvopastoriles. Se discuten los aspectos distribución y repartición (tiempo y espacio) y de sus ventajas y desventajas, también socioeconómicas
- Se presentan ejemplos de las asociaciones y sistemas encontrados en América Latina agrupándolos en árboles asociados con cultivos; en detalle en rotaciones agrícolas, árboles de madera comercial, árboles frutales, árboles de sombra y mejoramiento del suelo, cercas vivas y cortinas rompevientos, sistemas múltiples y huertos familiares.
- Igualmente se describen los sistemas de árboles asociados con pastizales y árboles asociados con cultivos y pastizales, presentando ejemplos de América Latina.
- Se discuten en detalle las posibilidades del modelaje de la materia orgánica, elementos nutritivos y del agua en agroecosistemas, especialmente en sistemas agroforestales, presentando ejemplos específicos.

LITERATURA

1. ABRAMS, M.M. et al 1989. Nitrogen accretion in soil and biomass production by three Prosopis species. Agroforestry Systems (Holanda) 10:93-97.
2. AGROFORESTRY SYSTEMS (eds.). 1983. What is agroforestry? Agroforestry Systems (Holanda) 1:7-12.

3. ALPIZAR, L. 1985. Untersuchungen über den Stoffhaushalt einiger agroforstlichen Systeme in Costa Rica. Tesis doctoral. Alemania, R.F., Universidad de Gotinga, Facultad de Ciencias Forestales. 189 p.
4. _____ . et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) y café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. I. Biomasa y reservas nutritivas. Turrialba (C.R.) 35:233-242.
5. _____ . et al. 1986. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with Cordia alliodora and Erythrina poeppigiana in Costa Rica. I. Inventory of organic matter and nutrients. Agroforestry Systems (Holanda) 4:231-257.
6. ALVIM, P. DE T. 1982. Una evaluación en perspectiva de los cultivos perennes en la cuenca Amazónica. In Hecht, S. (ed.). Amazonía, investigación sobre agricultura y uso de la tierra. Cali, Col., CIAT. p. 325-344.
7. ANDERSON, J.R.; HERDT, R.W.; SCOBIE, G.M. 1988. Science and food: the CGIAR and its partners. Washington, D.C., EE.UU., CGIAR. 134 p.
8. ARANGUREN, J.; ESCALANTE, G.; HERRERA, R. 1982. Nitrogen cycle of tropical perennial crops under shade trees. I. Coffea. Plant and Soil (Holanda) 67: 247-258.
9. _____ . 1982. Nitrogen cycle of tropical perennial crops under shade trees. II. Cacao. Plant and Soil (Holanda) 67:259-269.
10. AVILA, M et al. 1979. La importancia del componente forestal en pequeñas fincas ganaderas de Costa Rica. In Taller Sistemas Agroforestales en América Latina (1979, Turrialba, C.R.). Actas. Ed. por G. de las Salas. Turrialba, C.R., CATIE. 226 p.
11. BABBAR, L. (ed.). 1983. Curso Corto Intensivo sobre Técnicas Agroforestales (1983, Turrialba, C.R.). Contribuciones de los participantes. Comp. por L.Babbar. Turrialba, C.R., CATIE. 316 p.

12. BAGGIO, A.; HEUVELDOP, J. 1984. Initial performance of Calliandra calothyrsus Meissm. in live fences for the production of biomass. *Agroforestry Systems* (Holanda) 2:19-29.
13. BASTIAN, E.; GRAEFE, W. 1989. Afforestation with "multipurpose trees" in "media lunas", a case study from the Tarija basin, Bolivia. *Agroforestry Systems* (Holanda) 9:93-126
14. BEER, J.W. et al. 1979. Un estudio de caso sobre prácticas agroforestales tradicionales en el trópico húmedo: el proyecto "La Suiza". Turrialba, C.R., UNU-CATIE. 28 p.
15. _____. 1980. Alnus acuminata con pastos. Turrialba, C.R., CATIE. 6 p. (mimeogr.)
16. _____.; SOMARRIBA, E. (eds.). 1984. Investigación de técnicas agroforestales tradicionales: ejemplo de organización de cursos cortos. CATIE Serie Técnica. Boletín Técnico no. 12. 108 p.
17. _____.; FASSBENDER, H.W.; HEUVELDOP, J. (eds.). 1989. Avances en la investigación agroforestal (1985, Turrialba, C.R.). Memoria del seminario. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. 379 p.
18. _____. et al. 1990. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with Cordia alliodora and Erythrina poeppigiana in Costa Rica. V. Productivity indices, organic matter models and sustainability over ten years. *Agroforestry Systems* (Holanda) 12:229-249.
19. BENAVIDES, J.E. 1983. Investigación en árboles forrajeros. In Curso Corto Intensivo sobre Técnicas Agroforestales (1983, Turrialba, C.R.). Contribuciones de los participantes. Comp. por L. Babbar. Turrialba, C.R., CATIE. 27 p.
20. BISHOP, J. 1979. Producción ganadera-forestal en el trópico hispanoamericano. In Taller Sistemas Agroforestales en América Latina (1979, Turrialba, C.R.). Actas. Ed. por G. de las Salas. Turrialba, C.R., CATIE. p. 140-144.

21. BOONKIRD, S.A. et al. 1984. Forest villages: an agroforestry approach to rehabilitating forest land degraded by shifting cultivation in Thailand. *Agroforestry Systems* (Holanda) 2:87-102.
22. BUDOWSKI, G. 1980. Compilación de las ventajas y desventajas de los sistemas agroforestales en comparación con los monocultivos. Turrialba, C.R., CATIE. 2 p. (mimeogr.)
23. _____. 1984. Los sistemas agroforestales en América Central. In *Agroforestería* (1981, Turrialba, C.R.). Actas. Ed. por J. Heuvelodp; J. Lagemann. Turrialba, C.R., CATIE. 112 p.
24. _____. 1983. An attempt to quantify some current agroforestry practices in Costa Rica. In Huxley, P.A. (ed.). *Plant research and agroforestry*. Nairobi, Kenia, ICRAF. p. 43-62.
25. CARLOWITZ, P.G. VON. 1989. Agroforestry technologies and fodder production: concepts and examples. *Agroforestry Systems* (Holanda) 9:1-16.
26. CARVAJAL, J.F. 1984. Cafeto - cultivo y fertilización. 2 ed. Berna, Suiza, Instituto Internacional de la Potasa. 254 p.
27. CATIE (CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA). 1979. Taller Sistemas Agroforestales en América Latina (1979, Turrialba, C.R.). Actas. Ed. por G. de las Salas. Turrialba, C.R., CATIE. 226 p.
28. _____. 1985. Agroforestería árboles de uso múltiple en sistemas agroforestales. In Reunión del Grupo de Trabajo IUFRO 51.07.07 (2., 1985, Turrialba, C.R.). Resúmenes de las ponencias. Coord. R. Russo. Turrialba, C.R., CATIE. s.p.
29. _____; OET (ORGANIZACION PARA ESTUDIOS TROPICALES). 1987. *Sistemas agroforestales*. Turrialba, C.R., CATIE. 784 p.

30. CLEMENT, CH. 1987. The pejivalle palm (Bactris gasipaes H.B.K.) as a potential agroforestry species. In Advances in Agroforestry Research (1985, Turrialba, C.R.) Proceedings of a seminar. Ed. by J. W. Beer; H. W. Fassbender; J. Heuveldop. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 147. p. 182-188.
31. COMBE, J.; GEWALD, N.J. 1979. Guía de campo de los ensayos forestales del CATIE en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, C.R., CATIE 378 p.
32. _____. 1979. Ventajas y limitaciones del manejo de pastos con sistemas agroforestales. Turrialba, C.R., CATIE. p. irr. Presentado en el Taller Sistemas Agroforestales en América Latina (1979, Turrialba, C.R.).
33. _____.; BUDOWSKI, G. 1979. Clasificación de las técnicas forestales: una revisión de literatura. In Taller Sistemas Agroforestales en América Latina (1979, Turrialba, C.R.). Actas. Ed. por G. de las Salas. Turrialba, C.R., CATIE. p. 17-48.
34. CHAVELAS, J. 1979. Módulo de uso múltiple del suelo en regiones tropicales. In Taller Sistemas Agroforestales en América Latina (1979, Turrialba, C.R.). Actas. Ed. por G. de las Salas. Turrialba, C.R., CATIE. p. 82-86.
35. DANIEL, J.N.; ONG, C.K. 1990. Perennial pigeon pea: a multi-purpose species for agroforestry systems. *Agroforestry Systems* (Holanda) 10:113-129.
36. DENEVAN, W.M.; PADOCH, CH. 1987. Swidden - fallow agroforestry in the Peruvian Amazon. *The New York Botanical Garden* (EE.UU.). *Advances in Economical Botany* v.5. 107 p.
37. DEUTSCHE STIFTUNG FÜR INTERNATIONALE ENTWICKLUNG. 1983. The role of agroforestry in the Pacific. Ed. A. Schirmer. Campus Suva, Fiji, University of South Pacific. 104 p.
38. _____. 1984. *Agroforstwirtschaft in den Tropen und Subtropen*. Feldafing, Alemania, R.F. 258 p.

39. DUPRIEZ, H.; LEENER, P. DE. 1987. Jardins et verges de Afrique. Nivelles, Belgique, Terres et Vie. 360 p.
40. EDWARDS, C.A. et al. 1990. Sustainable agricultural systems. Ankeny, Iowa, EE.UU., Soil and Water Conservation Society. 696 p.
41. ESCALANTE, E. 1985. Promising agroforestry systems in Venezuela. Agroforestry Systems (Holanda) 3:209-221.
42. FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). 1963. Legumes in agriculture. FAO - Agricultural Studies no. 21. 367 p.
43. _____. 1984. Sistemas agroforestales en América Latina y el Caribe. Santiago de Chile, Oficina Regional para América Latina y El Caribe. s.p.
44. _____. 1987. Agriculture: towards 2000 (revised version). Roma, Italia. s.p.
45. _____. 1990. Assessing changes in tropical forest cover. FAO's 1990 assessment. Roma, Italia. s.p.
46. FASSBENDER, H.W. et al. 1985. Ciclos de la materia orgánica y elementos nutritivos permanentes tropicales, experiencias con cacao. In Seminar on Nutrient Research and Low Input Agriculture for the Tropics. Anais. Ed. por P. Cabala. Itabuna, Bra., CEPLAC. p. 231-257.
47. _____. et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora), café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. III. Modelos de la materia orgánica y elementos nutritivos. Turrialba (C.R.) 35:403-413.
48. _____.; BORNEMISZA, E. 1987. Química de suelos. San José, C.R., IICA. 420 p.

49. _____, 1987. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. CATIE. Serie de Materiales de Enseñanza no. 29. 475 p.
50. _____, et al. 1988. Modelling 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) 6:49-62.
51. FOURNIER, L.A. 1984. Recursos naturales. San José, C.R., Editorial Universidad Estatal a Distancia. 216 p.
52. GEUS, J G. DE. 1967. Fertilizer guide for tropical and subtropical farming. Zurich, Suiza, Centre d'Etude de l'Azole. 727 p.
53. GHUMAN, B.S.; LAL, R. 1990. Nutrient addition into soil by leaves of Cassia siamea and Gliricidia sepium grown on an ultisol in Southern Nigeria. Agroforestry Systems (Holanda) 10:131-133.
54. GLIESMANN, S.R. et al. 1981. The ecological basis for the application of traditional agriculture technology in the management of tropical agroecosystems. Agro-Ecosystems (Holanda) 7:173-185.
55. GRAEVES, A.; McCARTER, P.S. 1988. Cordia alliodora, 1922-1987. CAB International (G.B.). Annotated Bibliography no. 40. 28 p.
56. HART, R.D. 1980. Agroecosistemas, conceptos básicos. CATIE. Serie de Materiales de Enseñanza no. 1. 211 p.
57. HECHT, S. (ed.). 1982. Investigación sobre agricultura y uso de tierras. Cali, Col., CIAT. 448 p.
58. HEUVELDOP, J.; ESPINOZA, L. 1983. El componente arbóreo en Acosta y Puriscal. Turrialba, C.R., CATIE. 122 p.
59. _____; LAGEMANN, J. (eds.). 1981. Agroforestry (1981, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. Turrialba, C.R., CATIE. 102 p.

60. _____ et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) y café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. II. Producción agrícola, maderable y de residuos vegetales. Turrialba (C.R.) 35:347-355.
61. _____ et al. 1988. Modelling 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.
62. HOEKSTRA, D.; KUGURU, F.; NTIRU, R.C. (eds.). 1983. Agroforestry for small-scale farming systems. Proceedings of a Workshop (1982, Nairobi, Kenia). Nairobi, Kenia, ICRAF/BAT. 304 p.
63. HUXLEY, P.A. 1983. Plant research and agroforestry. Nairobi, Kenia, ICRAF. 617 p.
64. INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO. s.f. Gramíneas y leguminosas forrajeras en Colombia. ICA (Col.). Manual de Asistencia Técnica no. 10. 327 p.
65. INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH IN AGROFORESTRY. 1983. Guidelines for agroforestry diagnosis and design. Nairobi, Kenia. 25 p.
66. IMBACH, A. C. et al. 1989. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with laurel (Cordia alliodora) and poró (Erythrina poeppigiana) in Costa Rica. IV. Water balances, nutrient inputs and lixiviation. Agroforestry Systems (Holanda) 8:267-287.
67. JACOB, A.; UEXKUELL, H. VON. 1961. Fertilización. Amsterdam, Holanda, Internationale Handelmaatschappij voon Meststoffen. 626 p.
68. KANG, B.T. et al. 1981. Alley cropping maize (Zea mays L:) and Leucaena leucocephala (Lam) in Southern Nigeria. Plant and Soil (Holanda) 63:165-179.
69. KASS, D.L. et al. 1989. Resultados de seis años de investigación de cultivo en callejones (alley cropping) en "La Montaña". El Chasqui (C.R.) no. 19:5-24.

70. KING, K.F.S. 1968. Agri-silviculture (The Taungya system). University of Ibadan (Nigeria). Department of Forestry. Bulletin no. 1. 109 p.
71. LAL, R. 1989. Agroforestry systems and surface management of a tropical alfisol. III. Changes in soil chemical properties. *Agroforestry Systems (Holanda)* 8:113-132.
72. _____, 1989. Potential of agroforestry as a sustainable alternative to shifting cultivation: concluding remarks. *Agroforestry Systems (Holanda)* 8:239-249.
73. LEON, J. 1968. Fundamentos botánicos de los cultivos tropicales. IICA. Serie Textos y Materiales de Enseñanza no. 18. 487 p.
74. LOJAN, L. 1979. Sistemas agroforestales en el sur del Ecuador. *In* Taller Sistemas Agroforestales en América Latina (1979, Turrialba, C.R.). Actas. Ed. por G. de las Salas. Turrialba, C.R., CATIE. p. 132-134.
75. MALIK, R.S.; SHARMA, S.K. 1990. Moisture extraction and crop yield as a function of distance from a row of Eucalyptus tereticornis. *Agroforestry Systems (Holanda)* 12:187-195.
76. MARTINEZ, A.; ENRIQUEZ, G. 1981. La sombra para el cacao. CATIE. Serie Técnica. Boletín Técnico no. 5. 93 p.
77. MAY, P.H. *et al.* 1985. Babassu palm in the agroforestry systems in Brasil's Mid-North region. *Agroforestry Systems (Holanda)* 3:275-295.
78. MAYDELL, H.J. VON. 1984. Los sistemas agroforestales desde el punto de vista forestal. *In* Agroforestería (1981, Turrialba, C.R.). Actas del seminario. Ed. J. Heuveldop; J. Lagemann. Turrialba, C.R., CATIE. 112 p.
79. MOLDENHAUER, W.C.; HUDSON, N.W. 1988. Conservation farming on steep lands. Ankeny, Iowa, EE.UU., Soil and Water Conservation Society. 304 p.
80. MONTALDO, P. 1982. Agroecología del trópico Americano. IICA. Serie de Libros y Materiales Educativos. 205 p.

81. MONGI, H.O.; HUXLEY, P.A. (eds.). 1979. Soils research in agroforestry. Proceedings of an expert consultation (1979, Nairobi, Kenia). Nairobi, Kenia, ICRAF. 584 p.
82. MUELLER, E.; SCHER, S.J. 1990. Planning technical interventions in agroforestry projects. *Agroforestry Systems (Holanda)* 11:23-44.
83. MUSSAK, M.F.; LAARMAN, J.G. 1989. Farmers production timber trees in the cacao - coffee region of coastal Ecuador. *Agroforestry Systems (Holanda)* 9:155-170.
84. NAIR, P.K.R. 1979. Intensive multiple cropping with coconuts in India, principles, programmes and prospects. Berlín, Alemania, R.F., Paul Parey Verlag. 149 p.
85. _____. 1983. Agroforestry with coconuts and other tropical plantation crops. *In* Huxley, P.A. Plant research and agroforestry. Nairobi, Kenia, ICRAF. 617 p.
86. _____. 1984. Soil productivity aspects of agroforestry. ICRAF. Science and Practice of Agroforestry no. 1. 85 p.
87. _____. 1985. Classification of agroforestry systems. ICRAF Working Paper no. 28. 52 p. Publicado también en *Agroforestry Systems (Holanda)* 3:97-128.
88. NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES (EE.UU.); CATIE (CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA). 1984. Especies para leña, arbustos y árboles para la producción de energía. Turrialba, C.R., CATIE. 343 p.
89. ODUM, H.T. 1983. Systems ecology: an introduction. New York, EE.UU., J. Willey. 644 p.
90. OLADOKUN, M.A.O. 1990. Tree crop based agroforestry in Nigeria: a checklist of crops intercropped with cocoa. *Agroforestry Systems (Holanda)* 11:227-241.
91. OVALLE, C. *et al.* 1990. The espinal agroforestry systems of the mediterranean - type climate region of Chile. *Agroforestry Systems (Holanda)* 10:213-239.

92. PADOCH, C. *et al.* 1985. Amazonian agroforestry: a marked oriented system in Perú. *Agroforestry Systems* (Holanda) 3:47-58.
93. PEDERSON, H.B.; BALSLEY, H. 1990. Ecuadorean palms for agroforestry. Aarhus, Dinamarca, University of Aarhus, Botanical Institute. 131 p.
94. PEÑALOZA, R. *et al.* 1985. Applied research on multiple land use through silvicultural system in Southern Chile. *Agroforestry Systems* (Holanda) 3:59-77.
95. PRICE, N. 1983. El huerto mixto tropical: un componente agroforestal de la finca pequeña. *In* Curso Corto Agroforestal (1983, Turrialba, C.R.). Ed. por L. Babbar. Turrialba, C.R., CATIE. s.p.
96. ROCKENBACH, O.C. 1981. Análisis dinámico de dos sistemas de finca predominantes en el Cantón de Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag.Sc. Turrialba, C.R., CATIE-UCR. 175 p.
97. RUIZ, M.E. 1983. Avances en la investigación en sistemas silvo-pastoriles. *In* Curso Corto Agroforestal (1983, Turrialba, C.R.). Ed. por L. Babbar. Turrialba, C.R., CATIE. s.p.
98. RUSSO, R.O. 1990. Evaluating *Alnus acuminata* as a component of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* (Holanda) 10:241-252.
99. SANCHEZ, P.A. 1987. Soil productivity and sustainability of agroforestry systems. *In* Stepler, H.A.; Nair, P.K.R. *Agroforestry, a decade of development*. Nairobi, Kenia, ICRAF. 335 p.
100. SAUER, J. 1976. Living fences in Costa Rica. *Turrialba* (C.R.) 29:255-261.
101. SOMARRIBA, E. 1985. Arboles de guayaba (*Psidium guajava* L.) en pastizales. I. Producción de fruta y potencial de dispersión de semilla. *Turrialba* (C.R.) 35:289-295.
102. _____, 1985. Arboles de guayaba (*Psidium guajava* L.) en pastizales. II. Consumo de fruta y dispersión de semillas. *Turrialba* (C.R.) 35:329-332.

103. _____. 1990. Sustainable timber production from uneven-aged shade stands of Cordia alliodora in small coffee farms. *Agroforestry Systems (Holanda)* 10:253-263.
104. _____. 1990. ¿Qué es agroforestería?. *El Chasqui (C.R.)* no. 24:5-13.
105. STEPLER, N.; NAIR, P.K.R. 1978. *Agroforestry, a decade of development*. Nairobi, Kenia, ICRAF. 335 p.
106. STIENEN, H. 1990. The agroforestry potential of combined production systems in north-eastern México. *Agroforestry Systems (Holanda)* 11:45-69.
107. SZOTT, L.T. et al. 1988. *Agroforestry systems for acid soils in the humid tropics*. s.n.t. Presented of American Soc. of Agronomy Annual Meeting. American, Ca. (Sin publicar).
108. TECHNICAL ADVISORY COMMITTEE/ CONSULTATIVE GROUP ON INTERNATIONAL AGRICULTURE RESEARCH. 1987. *CGIAR priorities and future strategies*. Roma, Italia, FAO. s p.
109. _____. s.f. *Sustainable agricultural production: implications for international agricultural research*. Roma, Italia, FAO. s.p.
110. _____. 1991. *Elaboration of TAC's views on the relationship between the CGIAR and national research systems*. AGR/TAC: IAR/91/5. Roma, Italia, FAO. s.p.
111. TORRES, F. 1983. *El papel de las leñosas perennes en los sistemas agrosilvopastoriles*. Turrialba, C.R., CATIE. 46 p. Publicado también en *Agroforestry Systems (Holanda)* 1:131-168.
112. _____. 1983. Potential contribution of Leucaena hedgerows intercropped with maize to the production of organic matter and fuelwood in the lowland tropics. *Agroforestry Systems (Holanda)* 1:323-333.

113. TOKY, O.P.; KUMAR, P.; KHOSLA, P.K. 1989. Structure and function of traditional agroforestry systems in the western Himalaya. I. Biomass and productivity. *Agroforestry Systems (Holanda)* 9:47-70.
114. _____; KUMAR, P.; KHOSLA, P.K. 1989. Structure and function of traditional agroforestry systems in western Himalaya. II. Nutrient cycling. *Agroforestry Systems (Holanda)* 9:71-89.
115. VALENCIA, J.E. 1982. Investigaciones silviculturales y agroforestales adelantadas por CONIF. *In Amazonia, investigación sobre agricultura y uso de la tierra.* Ed. por S. Hecht. Cali, Col., CIAT. p. 407-422.
116. UNRUH, J.D. 1990. Interactive increase of economic tree species in managed swidden-fallows of the Amazon. *Agroforestry Systems (Holanda)* 11:175-197.
117. WITHINGTON, D.; GLOVER, N.; BREWBAKER, J.L. (eds.). 1987. *Gliricidia sepium* (Jacq) Walp.: Management and Improvement (1987, Turrialba, C.R.). Proceedings. Waimanalo, Hawaii, EE.UU., NFT. 255 p.
118. _____. 1988. Multipurpose trees species for small farm use. Arlington, Va, EE UU., Winrock International Institute for Agricultural Development. 282 p.
119. WUDD, W.D. 1990. Planning for agroforestry. Amsterdam, Holanda, Elsevier Science Publishers. 348 p.
120. YOUNG, A. 1987. Soil productivity, soil conservation and land evaluation. *Agroforestry Systems (Holanda)* 5:277-292.
121. _____. 1989. Ten hypotheses for soil-agroforestry research. *Agroforestry Today (Kenia)* 1:13-16.
122. _____. 1989. Agroforestry for soil conservation. CAB-International /ICRAF. Science and Practice of Agroforestry no. 4. 276 p.

CAPITULO TERCERO

EL CICLO DEL AGUA

3.1 El agua en la naturaleza

3.1.1. Ciclo general del agua

Uno de los grandes ciclos en la naturaleza es el del agua, ésta se mueve constantemente desde la atmósfera a la tierra, pasa por los ecosistemas -vegetación, animales y suelo- y por la corteza terrestre a los océanos y luego regresa a la atmósfera. Dentro de este ciclo hidrológico -dirigido por la energía del sol y la gravedad- se tiene la convención entre la atmósfera, litosfera e hidrosfera que hace posible en última instancia la vida en la biosfera. El ciclo hidrológico en un ecosistema es muy importante, ya que el agua determina la fisonomía de la vegetación y la distribución de los animales y es un factor de la formación del suelo. Además el agua desempeña, como solvente universal, un papel imprescindible en la transferencia de elementos químicos (2, 13, 19, 22, 38, 39, 43).

En la Figura 3.1. se presentan los procesos generales del movimiento del agua en la naturaleza (19). El agua que ingresa al ecosistema en forma de lluvia con la precipitación es característica de cada lugar, depende de sus condiciones fisiográficas (lugar, altura, circulación de masas de aire, formación de nubes, etc.). Parte de la lluvia es retenida por la vegetación (intercepción) y luego se evapora, igualmente que una parte del agua de la superficie del suelo. La escorrentía superficial es el movimiento lateral del agua sobre el suelo. Una parte del agua ingresa al suelo, es almacenada, puede ser absorbida por las plantas o lixiviada. El agua utilizada por las plantas es transpirada; el total del agua que regresa a la atmósfera es la evapotranspiración. En casos específicos se puede observar el ascenso capilar del agua freática.

3.1.2. El agua y la vegetación

El agua es determinante en la distribución de las plantas a nivel mundial. La forma más conocida en nuestro medio de clasificar las unidades de vegetación, es mediante las zonas de vida. La clasificación de las zonas de vida de Holdridge, (29) se basa en el conocimiento de los factores climáticos de temperatura y precipitación del área que se desea clasificar. Así, la cantidad promedio de precipitación total anual determina "provincias de humedad". Bajo condiciones tropicales se consideran las siguientes (29):

<u>Límites en mm</u>	<u>Provincia de humedad</u>
menos de 125	Desecado
125 a 250	Superárido
250 a 500	Perárido
500 a 1000	Arido
1000 a 2000	Semiárido
2000 a 4000	Sub-húmedo
4000 a 8000	Húmedo

Estas provincias de humedad están condicionadas a la relación de evapotranspiración potencial del lugar, en relación con la temperatura y la lluvia. En los bosques tropicales de bajura bajo condiciones húmedas se registran bosques siempre verdes. Una época de sequía corta (1 a 2 meses) puede inducir la caducifolia de algunas especies, resultando bosques siempre verdes estacionales, típicos de las regiones subhúmedas. Bajo condiciones semihúmedas se tiene en forma gradual la aparición de bosques medioverdes caducifolios. La disminución de la lluvia con el aumento de los meses áridos conlleva la aparición de bosques deciduos, xerofíticos y desérticos con sus formas típicas de sabanas, matorrales y desiertos (29, 30, 38, 49, 54).

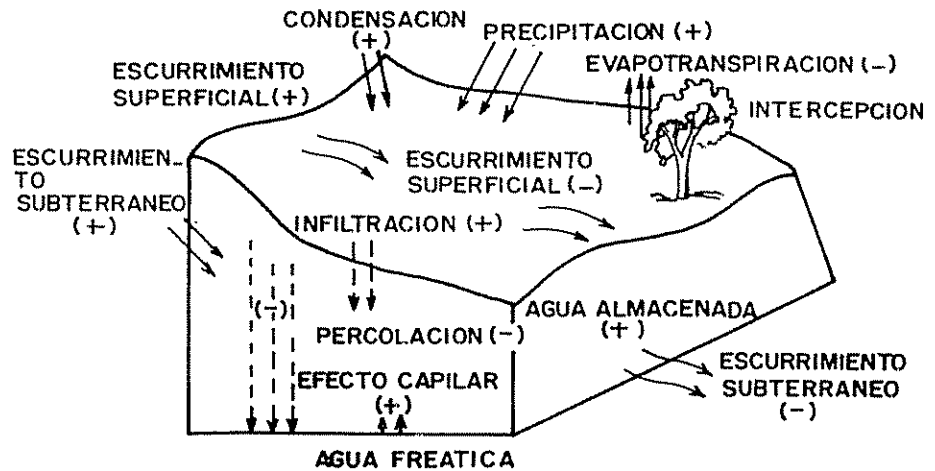


Figura 3.1. Ciclo del agua en la naturaleza (según Gavande, 19).

En la Figura 3.2. se presentan en forma general las relaciones entre la lluvia y la vegetación (16). La altura de los árboles disminuye de 40-50 m (Bosque siempre verde) a 10-20 m (Sabana húmeda), a 8-10 m (Sabana semihúmeda) y a 2-4 m (Sabana espinosa, matorral). La producción anual total y de hojarasca aumenta en forma inversa en 2-3 $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ hasta 20 $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$. Con el aumento del agua de lixiviación se tiene en forma paralela el aumento gradual de los procesos de formación de los suelos, resultando suelos profundos y altamente lixiviados (16).

Bajo condiciones de disminución de la temperatura en función de la altura se tiene en forma gradual el paso a regiones premontanas, montanas, subalpinas y alpinas con características definidas en la vegetación (29, 30, 49, 54).

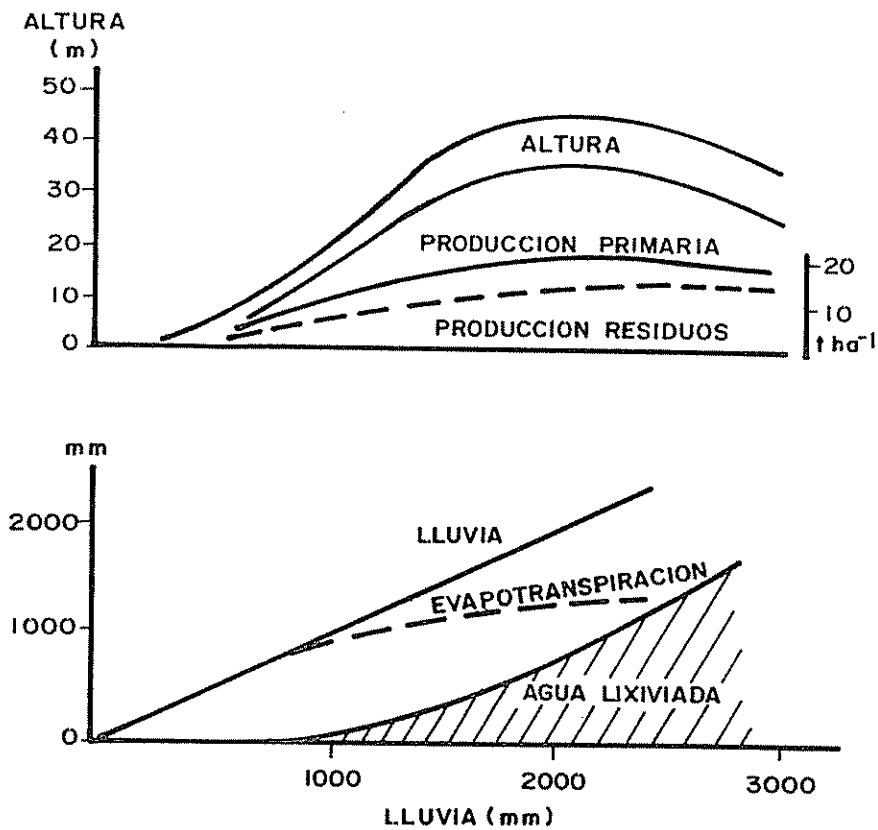


Figura 3.2. Relaciones entre la precipitación pluvial y la vegetación (según Fölster y Fassbender, 16).

La distribución y características de la vegetación han sido objeto de estudios muy minuciosos; algunos autores han descrito los aspectos globales de estas relaciones (2, 27, 29, 30, 31, 38, 41, 42, 45, 49, 54).

3.1.3 Los diagramas climáticos

Para caracterizar las condiciones climáticas de un lugar se utilizan los climadiagramas, en los cuales se representan las condiciones mensuales y globales de temperatura y precipitación (56). En la Figura 3.3 se ofrecen algunos ejemplos de climadiagramas de algunos lugares en Costa Rica. En cada uno de los climadiagramas se tiene información sobre un lugar específico, por ejemplo San José:

Lugar: San José

Altura sobre el nivel del mar: 1135 m NN

Duración de las mediciones: 42 años

Temperatura promedio anual: 20,2°C

Precipitación promedio anual: 1810 mm

Temperatura promedio mensual, línea de temperatura enero a diciembre

Precipitación promedio mensual, línea de lluvia en meses enero a diciembre

Temperaturas máxima y mínima absolutas y promedios (9,4 y 14,4°C mínimo, 33,3 y 26,7 máximo)

Oscilación promedio diaria de temperatura, 9,5°C

Meses con clima árido: enero, febrero, marzo y diciembre

meses con clima húmedo: abril y noviembre

Meses con clima perhúmedo (precipitación > 100 mm, representación logarítmica): mayo a octubre.

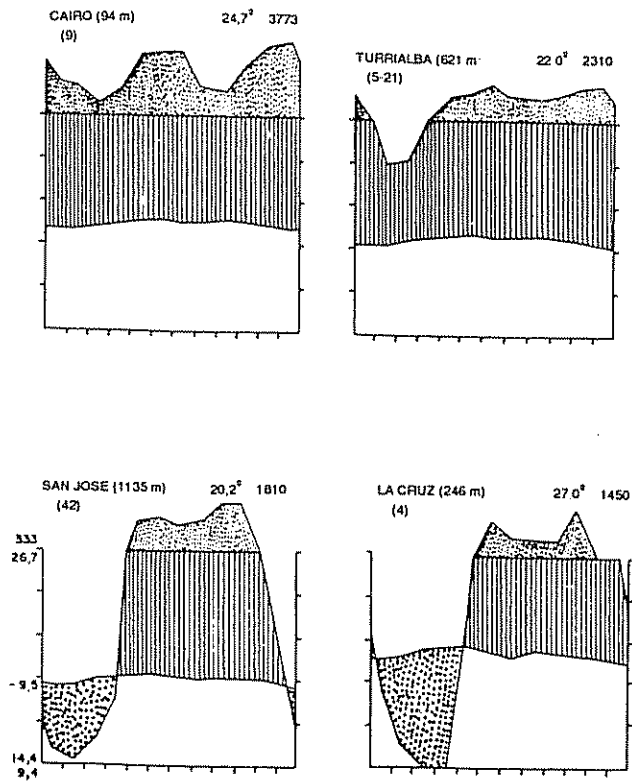


Figura 3.3. Diagramas climáticos de algunos lugares de Costa Rica (según Walter y Lieth, 56).

En el atlas mundial de los diagramas climáticos de Walter y Lieth (56) se han considerado cerca de 8000 estaciones, entretanto existe una cantidad mayor de ejemplos regionales y nacionales de las condiciones climáticas (24, 29).

3.1.4. El balance hídrico climático

Para establecer el balance hídrico de un lugar, es necesario conocer la precipitación y la evapotranspiración del mismo. Ello implica hacer una evaluación de las ganancias y pérdidas de agua del sitio (17, 19, 24, 39, 49).

Se considera que el balance de agua es la diferencia existente entre el ingreso y egreso de agua a un sistema. Cuando se trata de ecosistemas deben considerarse la vegetación y el suelo (evapotranspiración). Para estimar el balance de agua de un ecosistema como tal, se pueden utilizar diferentes fórmulas, por ejemplo (22):

$$P = EVT + F + S$$

En donde:

P = precipitación

ETV = evapotranspiración

F = flujo del agua

S = cambio de contenido de humedad en el suelo

La determinación de la evapotranspiración es clave, puede ser estimada mediante varios métodos; uno de ellos es el del estudio de la radiación neta. Se determina la radiación neta y se calcula la evaporación correspondiente (22):

$$Rn = Rg + Ra - Rfl - Rfc$$

Rn = radiación neta

Rg = radiación global, de onda larga

Ra = radiación atmosférica, de onda corta

Rfl = reflexión de onda larga

Rfc = reflexión de onda corta

Estas mediciones no se hacen frecuentemente por ser costosas. Haciendo uso del calor latente de vaporización, (580 calorías son necesarias para evaporar 1 gramo de agua) se calcula el agua evaporada.

Otra aproximación del balance hídrico climático se hace comparando el agua de precipitación y la evapotranspiración potencial medida en un tanque abierto de evaporación (class A pan). Se representan dos curvas superpuestas y en función de ellas se observan cuáles son los meses de sequía o humedad; por otro lado se puede

también evaluar el déficit o superavit de humedad mensual (Cuadro 3.1). Así se observa que para las condiciones de Turrialba el balance hídrico es positivo para todos los meses, a excepción del mes de marzo (8, 13).

Existen otras fórmulas para determinar la evapotranspiración y con ello establecer el balance hídrico. Sus ventajas y la aproximación a los valores reales han sido discutidos en detalle por Forsythe (17) y Gavande (19).

El balance hídrico arriba mencionado se basa en la determinación y en los valores de precipitación y evapotranspiración potencial mensuales y anuales a largo plazo. Un balance más real debe considerar los valores mensuales de los años en estudio. Así la precipitación real para Turrialba presenta los siguientes valores promedios y extremos (CATIE, 8; mm).

Valores	Promedio	Mínimo	Máximo
Anual	2648	1770	4348
Enero	174	49	371
Marzo	82	12	323
Julio	268	106	489
Setiembre	239	90	334
Diciembre	345	92	1249

Ello conlleva a que los valores mínimos de lluvia provoquen épocas de déficit hídrico, los valores máximos a épocas de exceso hídrico, siendo ambos perjudiciales para las plantas.

Un balance hídrico de ecosistemas naturales o agroecosistemas más exacto sólo se puede determinar registrando en observaciones periódicas el contenido de agua en los suelos. Para ello se utilizan tensiómetros de mercurio que dan los valores de tensión del agua del suelo. Conociendo la curva de tensión de agua del suelo se determina el contenido de agua en el suelo y considerando las lluvias se hace el balance de agua respectivo. También es posible hacer las determinaciones de agua en el suelo por métodos gravimétricos. Actualmente se desarrollan tecnologías de simulación del balance hídrico de ecosistemas, en los cuales en función de mediciones realizadas y con fórmulas matemáticas establecidas se describen los procesos del balance hídrico y por interacción se acercan los valores de predicción a los valores medidos, generándose así los resultados valederos (13, 38, 39, 44).

Cuadro 3.1. Ejemplo del balance hídrico en Turrialba, Costa Rica, incluyendo algunos datos climáticos importantes para la evapotranspiración (según CATIE*, 8)

	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Días de lluvia	Brillo solar horas	Humedad relativa %	Evapotrans- piración (mm)	Balance hídrico (mm)
Enero	21,0	170,9	18,5	4,71	86,9	89	+
Febrero	21,1	140,7	15,3	5,12	84,8	88	+
Marzo	21,9	70,5	13,6	5,11	84,8	117	-
Abril	22,5	135,2	15,3	4,87	85,0	112	+
Mayo	23,0	219,4	23,1	4,83	86,9	111	+
Junio	23,2	286,8	22,0	4,10	88,8	98	+
Julio	22,8	275,2	25,3	3,77	89,8	81	+
Agosto	22,9	239,9	24,2	4,35	88,8	90	+
Setiembre	23,0	252,8	22,7	4,53	88,1	96	+
Octubre	22,9	241,0	22,0	4,75	88,7	98	+
Noviembre	22,2	286,7	22,2	4,17	89,6	87	+
Diciembre	21,4	238,3	21,5	4,20	88,8	86	+
TOTAL	-----	2647,5	245,7	-----	-----	1153	+1495
PROMEDIO	22,3	-----	20,5	4,54	87,6	-----	-----

* Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.

3.2. El agua en el suelo

3.2.1. Aspectos generales

El suelo es un componente abiótico de los ecosistemas y de los sistemas de producción. Consta de tres fases: sólida, líquida y gaseosa. En condiciones ideales, la fase sólida constituye un 40-50 %, de los cuales un 3-5 % constituye la materia orgánica. La fase líquida y la fase gaseosa constituyen el resto del suelo y son intercambiables; tanto la fase líquida como la gaseosa dependen de la porosidad del suelo. La relación que guarda una con respecto a la otra, depende fundamentalmente de las lluvias.

El agua representa la fase líquida y llena los poros del suelo; esta agua se puede localizar en tres tipos de poros diferentes, que son: los macroporos, los mesoporos y los microporos. Los macroporos tienen un diámetro mayor de 50 micras; los mesoporos una dimensión que oscila entre 50 y dos micras y los microporos tienen un diámetro menor de 2 micras (17, 19).

El agua en los macroporos no puede ser retenida debido a que es mayor la fuerza de gravedad que las fuerzas de retención que ejercen las paredes de los macroporos por lo que da lugar al agua de percolación o de gravedad. La mayor cantidad de agua disponible se encuentra en los mesoporos y el agua en los microporos es retenida con tal fuerza que no es disponible para las plantas.

La textura del suelo depende del contenido de arena, limo y arcilla (Cuadro 3.2). Esta propiedad es determinante en la retención de agua en el suelo e influye en el abastecimiento de nutrimentos y aire para las plantas. Las arenas, limos y arcillas pueden subdividirse en gruesas, medianas y finas (17, 19).

Cuadro 3.2. Clasificación de las partículas del suelo (según Gavande, 19)

Partículas	Diámetros (límites en cm)	Diámetros (límites en mm)
Esqueleto	mayor que 2	mayor que 2000
Arena	2 - 0,06	200 - 60
Limo	0,06 - 0,002	60 - 2
Arcilla	menores que 0,002	menor que 2

El análisis mecánico de los suelos permite determinar las partículas sólidas que se presentan en diferentes tamaños (17). Este análisis proporciona datos básicos para la clasificación, morfología y génesis de suelos, así como también permite obtener información sobre propiedades físicas tales como: permeabilidad, retención de agua, plasticidad, aireación, etc. Existen varios métodos para el análisis mecánico de los suelos. El más usado se basa en la ecuación de sedimentación que se fundamenta en la ley de Stokes, e implica muestrear las arenas, limos y arcillas después de pasar 10 cm de sedimentación en cilindros apropiados. Antes de proceder al análisis mecánico de los suelos, se necesita dispersarlos, es decir, separar por métodos químicos o mecánicos las partículas del suelo que siempre se encuentran formando agregados.

Obteniendo el porcentaje de arena, arcilla y limo se hace uso del triángulo de texturas que da la clasificación textural del suelo, (Gavande, 19, Forsythe 17). Cuando se sobrepasa el 60 % de contenido de arenas se tiene un suelo típicamente arenoso. El suelo franco es el ideal, en donde las partículas de arcilla retienen el agua, mientras que las de arena permiten la aeración. Los suelos franco arenoso, franco arcilloso y franco limosos son aquellos que contienen, predominantemente, la respectiva clase de partículas.

La estructura es la disposición de las partículas elementales (arena, limo, y arcilla) que forman partículas compuestas, separadas de las contiguas y que tienen propiedades diferentes de las de una masa igual de partículas elementales sin agregación. La estructura afecta el crecimiento de las plantas, debido a su influencia en el aire y agua del suelo, así mismo influye sobre el movimiento del agua y las relaciones de temperatura en el suelo. Los agregados del suelo determinan las características de absorción del agua del suelo. Algunas sustancias se acumulan entre las partículas del suelo, "ligándolas" de cierta forma para formar los agregados, para lo cual debe existir un material que pueda ser adicionado. Se tendrá mayor número de agregados mientras más arcilla haya en el suelo, puesto que éstas unen a partículas de mayor tamaño y a la propiedad de las arcillas de hincharse y contraerse con los cambios de humedad. Las arenas y limos no forman agregados si no se encuentran presentes coloides. Los agregados de un suelo deben presentar un arreglo tal que permitan una buena distribución de los poros y deben ser estables a pesar de los cambios de humedad. Las aristas redondeadas de los agregados permite una mejor distribución de los poros (17, 19).

La infiltración y la permeabilidad están íntimamente ligadas con el tamaño de los poros y con la estabilidad de las unidades estructurales

del suelo. La estabilidad estructural es la capacidad que tienen los granos de retener su forma cuando se humedecen y de permitir el paso del agua a través del suelo (17, 19, 38).

La velocidad de infiltración inicial disminuirá rápidamente una vez que se llenen las grietas o espacios grandes del suelo, pues cuando este se hincha la velocidad puede bajar a valores cercanos a cero. Sin embargo esta velocidad depende también de la textura de los suelos y de la cantidad y calidad de sus agregados. Los suelos que están bien estructurados y con un tamaño apropiado de agregados tienen una buena infiltración inicial, que no se reduce a niveles muy bajos cuando se mojan.

La materia orgánica ejerce influencia en las propiedades físicas del suelo, tales como la estructura y afecta directamente el movimiento y retención del agua, mejorando las características del suelo en relación con estos aspectos. Además de mejorar las condiciones físicas del suelo, la materia orgánica contribuye a mejorar las propiedades químicas que aumenta la capacidad de intercambio catiónico del suelo.

3.2.2. Constantes de humedad del suelo

Curva de retención del agua

Cada suelo presenta, en función de sus características, diferentes constantes de humedad que se caracterizan con la curva de retención del agua. En función de los tamaños de los poros se diferencian el agua de drenaje, capilar y de adhesión. El agua disponible para las plantas es la capilar, localizada entre el punto de capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. La determinación de la curva de retención del agua se realiza en el laboratorio con ollas de presión con diferentes valores (entre 0 y 20 atmósferas), generalmente se determina el contenido de agua en las constantes de humedad. Los detalles de estas determinaciones han sido descritos por Gavande (19) y Forsythe (17).

Punto de saturación

Dependiendo de la textura, el contenido de materia orgánica y la composición química, los suelos pueden retener determinada cantidad máxima de agua. Se puede decir que un suelo alcanza el punto de saturación cuando retiene la máxima cantidad de agua que le permiten sus características particulares.

Es importante anotar que la materia orgánica (humus) tiene una elevada capacidad de retención de agua y que algunas sustancias químicas, por sus características higroscópicas, pueden influir también en la capacidad del suelo para retener el agua.

Los suelos arcillosos alcanzan su punto de saturación con un 49 % de contenido de agua, mientras que los limosos llegan a él con un 48 % de agua. Las arenas pueden retener menos agua y su punto de saturación se logra aproximadamente con el 45 % de agua.

· Capacidad de campo

La capacidad de campo es la cantidad de agua retenida por un suelo o afectada por la gravedad, dejándola drenar libremente, se determina sometiendo las muestras de suelo a una presión de 0,2 bares (17).

La capacidad de campo es una característica en la que intervienen no sólo el suelo en sí mismo, sino que además intervienen el drenaje, la evaporación y transpiración y el agua que se agrega. Por esta razón, sólo puede determinarse con exactitud en condiciones de laboratorio.

· Punto de marchitez permanente

Es el punto en el que las plantas se marchitan permanentemente porque el agua del suelo es retenida de tal forma que no puede ser obtenida por las plantas. Este punto corresponde, aproximadamente, a la cantidad de agua en equilibrio en el suelo a una presión de 15 bares. Depende más de las características osmóticas de la planta que de las características del suelo.

· Aqua disponible

Se refiere a la cantidad de agua almacenada que puede ser utilizada por las plantas. Aunque existen plantas con capacidad de absorción de agua mayor que otras, en general, el agua disponible es la que pueden obtener las plantas de la cantidad almacenada, entre los 0.2 bares y los 15 bares (17, 19).

Varios son los factores que influyen en el agua disponible:

- Masa (matrix) del suelo: la clase y cantidad de coloides influyen en la retención del agua, así como la clase y cantidad de iones (composición química) de la solución del suelo; al igual que la cantidad o grado de agregación.

- Densidad aparente: indica la cantidad de materia sólida en un volumen dado de suelo, dependiendo por tanto de la composición y compactación. El aumento en la densidad aparentemente disminuye la cantidad de agua retenida.
- Solutos: los solutos disueltos influyen en la velocidad de absorción y en la cantidad de agua que absorben las plantas.
- Histéresis: se refiere a la forma cómo el suelo ha adquirido su humedad. Es decir, los procesos alternos y secuenciales de mojado y secado. El suelo adquiere diferentes características si está seco o mojado, dependiendo también cómo adquiere y pierde la humedad.

Para el cálculo del agua disponible retenida en el suelo se tienen que considerar las profundidades de los horizontes del suelo y el contenido de esqueletos. Los valores de retención de agua disponible (porcentaje, $1.m^{-1}$) se calculan como la diferencia del agua retenida a 0,2 y 15 bares. Multiplicando este valor por la profundidad del horizonte en dm se obtiene el valor del agua disponible en mm, o $1.m^{-2}$ (13, 17, 19). Puesto que los perfiles tienen a veces cierto contenido de esqueleto (rocas) se debe corregir el primer valor de agua disponible, restando el porcentaje de esqueleto para obtener así el agua disponible final. Al sumar los valores de agua disponible, de los horizontes se obtiene su total en el suelo (Ver Capítulo 3.4.3).

3.2.3. Movimiento del agua

Existen diferentes formas del movimiento del agua en el suelo. El agua de la precipitación que toca la primera capa del suelo, puede filtrarse, en parte, a través del mantillo, y otra parte, desplazarse horizontalmente (17, 19, 38, 44). Después que el agua se ha infiltrado por los primeros horizontes del suelo, puede suceder que al llegar a una capa más dura se desplace horizontalmente. Así resulta la escorrentía profunda. El agua que se filtra a través del suelo llega hasta la capa freática. El agua freática suele llamarse también de drenaje. Si el agua permanece en el suelo se le llama de inundación, produce características anaeróbicas (gley) y generalmente limita el desarrollo radicular.

Las escorrentías superficiales y profundas son fenómenos ligados íntimamente a la erosión de los suelos. La erosión es el proceso de separación y transporte de materiales del suelo por los agentes de la erosión como el agua y el viento. Se ve afectada por factores como la capacidad de absorción y retención del agua por los suelos, la condición

de la superficie y la infiltración, la permeabilidad del suelo y la facilidad de dispersión de sus partículas; así también como por el tamaño de las partículas y el grado de agregación del suelo.

Dependiendo de la cobertura vegetal, las características de los suelos y otros factores como la forma del relieve y la inclinación, la pérdida del suelo por efecto de escurrimientos puede afectar enormemente la productividad.

3.3. Ciclo del agua en ecosistemas

3.3.1 Aspectos generales

El ciclo del agua en los ecosistemas forestales ha sido poco estudiado y actualmente se están desarrollando tecnologías apropiadas para este fin. El agua que ingresa al ecosistema depende del régimen de lluvias y está asociada a la posición geográfica de la región, la circulación planetaria de las masas de nubes y de aire, temperatura, vegetación y a otros factores. Una parte del agua que ingresa al ecosistema forestal es retenida por las hojas de la vegetación (intercepción), la cual se evapora en función de la temperatura y la radiación solar. Otra parte del agua que llega al rodal se escurre de las hojas o a lo largo de los tallos y llega por gravedad a la superficie de la capa de mantillo del suelo; esta agua puede escurrirse sobre la superficie del suelo o infiltrarse en el mismo. El agua almacenada en el suelo, en función de sus características de textura y estructura, representa la reserva de donde las plantas absorben las cantidades necesarias para sus ciclos energéticos y nutrimentales; una parte del agua almacenada en los tejidos vegetales se difunde a través de las membranas celulares y pasa a la atmósfera en forma de vapor como agua de transpiración. Cuando el agua que ingresa al suelo sobrepasa la capacidad de retención del mismo y en función de la gravedad pasa a la capa freática, egresando del ecosistema (13, 17, 19, 22, 27, 38).

La cuantificación del agua en cada uno de estos procesos permite una descripción del ciclo del agua de los ecosistemas. Para ello se necesitan instrumentos específicos. El agua que llega a la superficie del bosque se puede medir colocando pluviómetros en un área cercana del bosque, sin vegetación, de modo que la superficie receptora del pluviómetro forme un ángulo máximo de 45 grados con la copa de los árboles circundantes. El agua que cae a través de las copas, ya sea directamente o por goteo de las hojas, se determina colocando los pluviómetros debajo del dosel del bosque. El agua que se escurre por los tallos es influida por la posición de las ramas en relación con el

tronco principal y se puede estimar colocando recolectores de agua alrededor del fuste. El agua interceptada por las copas se puede estimar restando a la precipitación total, la suma del agua de escurrimiento de los tallos y del agua que cae a través de las copas. El movimiento del agua en el suelo se hace mediante el uso de placas lisimétricas a diferentes profundidades.

3.3.2. Ejemplos del ciclo del agua en ecosistemas forestales

En áreas tropicales y subtropicales existe como se indicó anteriormente, una gran cantidad de datos sobre regímenes pluviales (24, 27, 29). La descripción completa del ciclo hidrológico ha sido hasta ahora objeto de pocas investigaciones (6, 7, 15, 20, 22, 35, 36, 37, 43, 44).

A manera de ejemplo se presentan los métodos y resultados obtenidos en un programa de estudio de ecosistemas forestales de San Eusebio en la región occidental de los Andes de Venezuela (Sierra de Mérida 8°37'N, 71°21'E, 2300 msnm, 22, 52). En detalle se hicieron las siguientes mediciones (21, 22, 52, ver Figura 3.4):

- Lluvia o ingreso de agua al ecosistema en una parcela de tala rasa utilizando un pluviógrafo de registro continuo y 30 pluviómetros de material plástico
- lavaje foliar bajo el rodal utilizando igualmente 30 pluviómetros, distribuidos en tres líneas de 10 pluviómetros a distancia de 5 metros entre ellos
- el lavaje de tallos en cuatro subparcelas de 100 m², en las cuales se ajustaron canaletas de caucho colectoras de agua en el tallo de todos los árboles con un diámetro a la altura del peso, mayor de 10 cm.
- la intercepción, equiparable a la evaporación desde el rodal, se calculó como diferencia entre la lluvia y la suma del lavaje foliar y de los tallos.
- la lluvia bajo el rodal, equiparable al ingreso de agua en el suelo, se calculó como la suma del lavaje foliar y del lavaje de tallos.

- el escurrimiento superficial en el suelo en seis subparcelas de 10 m², distribuidas en forma radial en una parcela, construidas con canaletas de lluvia.
- la evaporación potencial se determinó con una balanza o tanque de evaporación de registro semanal continuo (Fa. Lambrecht) en la parcela del bosque.
- El contenido de agua en el suelo y su cambio durante el año de observaciones se determinó en función de valores de tensiómetros en 20, 45 y 90 cm de profundidad con tres repeticiones y la curva de succión característica del suelo. Para la recolección de muestras de agua se colocaron placas lisimétricas de cerámica con ocho repeticiones de 20, 40 y 90 cm en el suelo mineral. En función de las observaciones de la tensión de agua en las diferentes profundidades con los tensiómetros se transfirió la misma tensión a las placas lisimétricas con una carga de agua variable con un sistema de capilares, regulada con dos observaciones semanales. Las muestras de agua de percolación obtenidas representan así exactamente las condiciones hidrológicas en el suelo. Para la recolección de muestras se consideraron las placas bajo la capa de mantillo, a 20 y 90 cm de profundidad en el suelo mineral con tres repeticiones cada mes, resultando 36 muestras en el año de estudio.
- La evapotranspiración real se calculó en función de datos climáticos según la fórmula (22):

$$R_n = R_g + R_a - RF_c - RF_l$$

donde R_n es la radiación neta,

R_g es la radiación global medida con un radiógrafo de registro semanal continuo de la Fa. Robitzsch,

R_a es la radiación atmosférica calculada según la fórmula de Angstrom,

RF_c es la reflexión de onda corta con un valor promedio del 15%,

RF_l es la reflexión de onda larga calculada con la constante de Boltzmann con un coeficiente de emisión de 0,97.

- La transpiración del rodal, equiparable a la absorción de agua a partir del suelo, se calculó como la diferencia entre la evapotranspiración y la evaporación (intercepción) del rodal.
- El agua de percolación, que egresa del ecosistema, se calculó como la diferencia entre el agua que ingresó al suelo mineral y la absorción por el rodal.

Se tomaron muestras de agua de las mediciones realizadas y con las concentraciones encontradas para los diferentes elementos químicos analizados se calcularon los valores promedios mensuales y las desviaciones estándares respectivas. En función de las concentraciones (mg.l^{-1}) y las cantidades de agua en cada uno de los flujos (mm , $1.\text{m}^{-2}$) se calcularon las tasas de transferencia correspondientes.

Los valores anuales de los flujos hidrológicos obtenidos fueron (mm o $1.\text{m}^{-2}$, 22) (Figura 3.4):

Lluvia. Ingreso al ecosistema		1 576
Lavaje foliar		1 259
Lavaje tallos		11
Intercepción	mm	304
	%	29
Ingreso al suelo		1 271
Ecurr. superf.		14
Suelo		6
Evapotranspiración	kcal	57
	mm	981
Transpiración		676
Percolación		
Egreso del suelo		588

La lluvia o ingreso de agua al ecosistema alcanzó un valor anual de 1 576. Durante el año de observación se registraron dos épocas de lluvias abundantes (abril/mayo y setiembre/octubre). Los mínimos de lluvias se registraron en febrero y junio, respectivamente. El lavaje foliar alcanzó un valor anual total de 1260 mm, correspondiendo al 80 % de la lluvia. Los valores mensuales presentan en el transcurso del año las mismas tendencias que la lluvia, entre los valores mensuales de ambos flujos existe una correlación estadísticamente significativa de acuerdo con la ecuación:

$$Y (\text{lavaje}) = 0,994 X (\text{lluvia}) - 25,56$$

$$r = 0,99^{+++}$$

La intercepción alcanzó un valor total anual de 305 mm, equivalentes al 19 % de las lluvias. En la distribución anual se observa, como se esperaba, que la intercepción tiene valores más altos en los meses de menor pluviosidad; en los meses "secos" de febrero y junio se registraron 15 días de lluvias, y 28 en los "lluviosos" de setiembre y octubre. La correlación:

$$Y (\% \text{ de intercepción}) = 44,19 - 0,13 X (\text{lluvia mensual})$$

$$r = 0,81^{+++}$$

confirma la situación e indica que al aumentar la pluviosidad disminuye el agua retenida en el rodal.

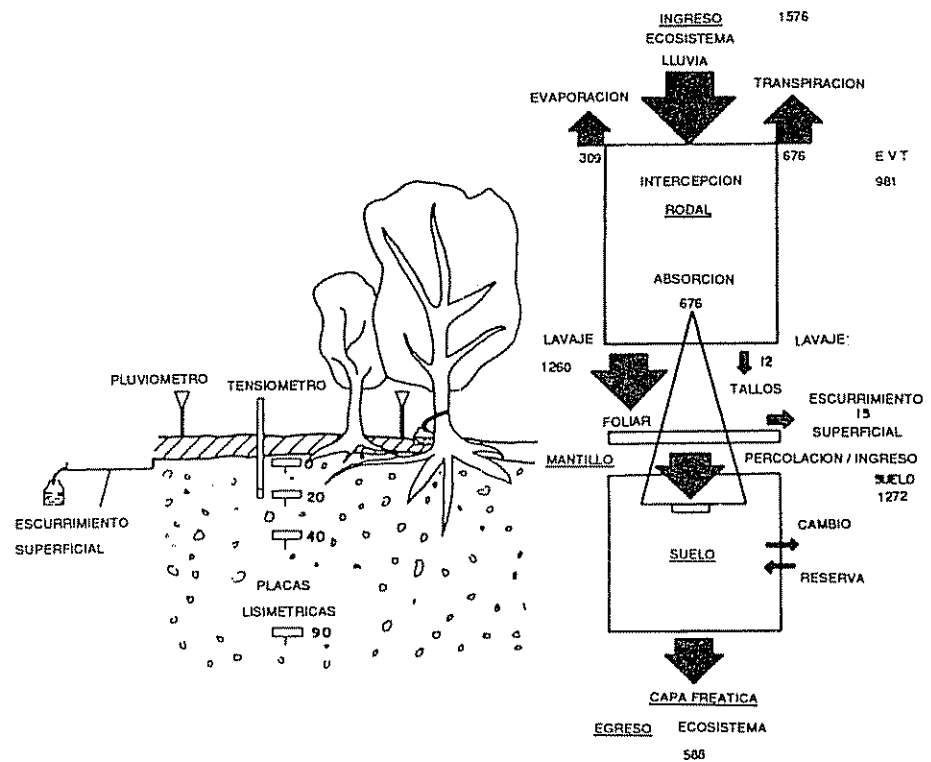


Figura 3.4. Representación esquemática de las mediciones de flujo de agua en el ecosistema (sin escala) y valores encontrados en San Eusebio, Venezuela (l.m), (según Grimm y Fassbender, 21).

En forma global se puede expresar un valor de 1 000 mm de evapotranspiración, correspondientes 300 a evaporación y 700 a transpiración. Ello equivale a una evapotranspiración diaria de en promedio 2,7 mm. Ello es representativo para bosques montañosos.

El agua de percolación, equiparable al agua que egresa del ecosistema, alcanzó un valor anual de 588 mm; los valores mensuales presentan una distribución paralela a las lluvias. Así, en los meses de mayor pluviosidad y después de la saturación del suelo con agua se observa la percolación.

Una comparación con los pocos datos encontrados en la literatura resulta difícil, ya que las lluvias, estructuras de los ecosistemas, etc., son muy diferentes. Sin embargo, es interesante observar que en un bosque de llanura en Santa Fé, Panamá (20), se encontró una participación de los flujos de agua en el ecosistema muy similar al de San Eusebio; de los 1933 mm de lluvia anual corresponde el 17 % a la intercepción y el 39 % a la percolación del suelo.

3.3.3. Deposición y transferencia de elementos químicos con el agua

El agua también desempeña un papel importante en la transferencia de elementos químicos en la biosfera. La transferencia de elementos químicos nutritivos tales como el nitrógeno ha sido conocida desde hace mucho tiempo (11), sin embargo, la transferencia de elementos tóxicos en asociación con la contaminación global ha sido motivo de estudios en los años recientes (52). Como ejemplo se presentan los estudios realizados por Steinhardt y Fassbender (52) y Grimm y Fassbender (22) en los Andes Occidentales de Venezuela, descritos anteriormente.

Los valores promedios anuales del pH y elementos químicos encontrados están sumarizados en el Cuadro 3.3.

Los valores relativamente altos encontrados para los elementos N, S y Cl y Na se deben seguramente a la quema excesiva de gases de la extracción de petróleo y la industria petroquímica al norte de la región del estudio y a la formación de aerosoles de NaCl que ascienden en los flancos de los Andes con los vientos alisios reinantes (22).

Cuadro 3.3. Valor promedio anual de pH y elementos químicos ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) en el agua de diferentes niveles de transferencia en el ecosistema de San Eusebio, Venezuela (según Grimm y Fassbender, 22).

	pH	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	Na
Lluvia	4,55	0,64	0,052	0,214	0,385	0,514	0,070	0,022	0,157	0,278
Esc. foliar	5,62	0,72	0,079	7,83	0,765	0,450	0,045	0,026	0,191	0,466
Esc. tallos	5,92	0,94	0,096	11,71	1,331	0,452	0,326	0,040	0,271	0,356
Ingr. suelo	5,34	4,56	0,291	38,39	5,082	2,09	0,548	0,101	1,059	0,415
Egr. suelo	4,92	0,77	0,016	0,451	0,412	0,113	0,057	0,013	0,180	0,269

Para todos los elementos analizados se observa un cambio de sus concentraciones al pasar por el ecosistema. Así, las concentraciones aumentan con el escurrimiento foliar, alcanzan el valor más alto al pasar por la capa de mantillo y finalmente disminuyen en el suelo mineral. Esta distribución es típica para N, P, K, Ca y Mn; para el Mg no se observa un aumento en el escurrimiento foliar; para el Na y Al se observa el valor más alto en 20 cm de profundidad en el suelo, posiblemente debido a que estos elementos no son absorbidos selectivamente por las plantas. El potasio arroja los valores más extremos al atravesar el ecosistema, llegando a $38 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ al ingresar al suelo mineral, donde es absorbido por las plantas rápidamente, alcanzando a 90 cm de profundidad solamente $0,45 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$; estudios en otros ecosistemas forestales indican que este elemento es translocado muy rápidamente.

La transferencia de elementos químicos con el agua a través del ecosistema se ha resumido en el Cuadro 3.4 en forma comparativa con otros estudios de regiones tropicales y subtropicales. Sin embargo, una comparación absoluta es difícil, ya que existen diferencias entre los métodos de recolección de las muestras y especialmente de la duración de los estudios.

Los valores de ingreso en el ecosistema para nitrógeno y elementos alcalinos registrados en San Eusebio son más bajos que los de otros estudios, especialmente para N en Gambia (53) y para Na en Nigeria (34) y Puerto Rico (42); tal como fue discutido anteriormente, el ingreso de elementos al ecosistema con las lluvias depende notablemente de las condiciones atmosféricas reinantes (tormentas) y de las cercanías de las costas. Una contaminación de P en las muestras, tanto en los valores propios como en los de otros autores, es factible.

Cuadro 3.4. Transferencia de elementos químicos con el ciclo hidrológico ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) (según diferentes autores).

Lugar, país (Autor)	N	P	K	Ca	Mg	Fa	Mn	Al	Na
LLUVIA									
San Eusebio, Venezuela (21,22)	9,90	1,10	2,60	5,56	5,20	0,90	0,23	2,40	3,26
Manaos, Brasil (37)	10,00	0,30	--	3,70	3,00	--	--	--	--
Manaos, Brasil (7)	5,00	0,40	--	0,26	0,18	0,60	--	--	--
Sta. Fe, Panamá (20)	--	0,96	9,50	29,30	4,86	3,00	0,43	--	--
El Verde, Pto. Rico (42)	14,00	--	--	33,60	26,30	--	--	--	135,10
Kade, Ghana (41)	14,00	0,42	17,50	12,70	11,30	--	--	--	--
Younde, Camerún (5)	12,00	1,70	12,00	3,80	1,50	--	--	--	--
Samaru, Nigeria (35)	4,80	--	37,20	1,00	2,90	--	--	--	61,10
Kampala, Uganda (55)	19,10	--	21,60	--	--	--	--	--	21,70
Zaire (55)	6,40	--	2,00	3,90	1,10	--	--	--	1,70
ESCURRIMIENTO FOLIAR									
San Eusebio, Venezuela (21,22)	8,56	1,40	69,70	6,86	3,30	0,47	0,24	2,30	4,40
Manaos, Brasil (7)	25,00	0,90	--	10,50	6,78	0,50	--	--	--
Sta. Fe, Panamá (20)	--	0,61	50,00	37,50	9,80	4,28	0,34	--	--
El Verde, Pto. Rico (42)	72,00	--	--	69,40	25,20	--	--	--	211,70
Kade, Ghana (41)	26,50	4,10	237,70	41,60	29,20	--	--	--	--
Banco, Costa Marfil (4)	81,00	9,80	175,00	47,00	48,00	--	--	--	--
ESCURRIMIENTO TALLOS									
San Eusebio, Venezuela (21,22)	0,06	0,02	1,00	0,12	0,04	0,02	0,003	0,03	0,03
Manaos, Brasil (7)	15,00	0,60	--	5,80	2,05	0,26	--	--	--
El Verde, Pto. Rico (42)	--	--	--	11,30	6,06	--	--	--	3,18
EGRESO DEL SUELO									
San Eusebio, Venezuela (21,22)	5,10	0,26	2,20	1,60	0,60	0,26	0,09	1,00	1,30
Manaos, Brasil (7)	29,00	0,30	--	0,90	0,50	3,60	--	--	--
Sta. Fe, Panamá (20)	--	0,70	9,30	263,20	43,60	10,10	0,30	--	--
El Verde, Pto. Rico (42)	--	--	--	43,80	18,20	--	--	--	87,60
San Carlos, Venezuela (35)	20,60	26,90	13,30	11,60	3,50	--	--	--	--
Turrialba, Costa Rica (25)	5,00	0,20	3,20	1,10	1,70	--	--	--	6,50
Rheus, Brasil (50)	22,90	--	21,40	17,90	11,70	--	--	--	--

Para el escurrimiento foliar se encuentran para el ecosistema de San Eusebio valores generalmente más bajos que los de la literatura. En el caso del N se encuentran diferencias hasta de una décima potencia (San Eusebio 8,5, Costa de Marfil (4) 81 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$). Más extremo es el caso del Na, donde en San Eusebio se registraron 4,4 y en El Verde en Puerto Rico (42) 221,7 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$.

Aunque las concentraciones de los elementos químicos en el escurrimiento de tallos son generalmente más altas que en el escurrimiento foliar, resulta, en función de las cantidades, una transferencia menor en el transcurso del año. Tanto, que las cantidades casi no son de importancia en una observación total del ciclo de los elementos estudiados. Valores comparativos sólo se han encontrado para El Verde en Puerto Rico (42), donde las tasas son generalmente mayores.

Valores comparativos para la percolación del suelo -egreso del ecosistema- sólo se han encontrado en dos estudios, en Santa Fé, en Panamá (20) y en El Verde, en Puerto Rico (42), donde se recolectaron muestras en un riachuelo cercano al sitio de los estudios. En ambos

casos se han encontrado egresos de elementos químicos más altos que en el ecosistema de San Eusebio. La única pérdida importante registrada en este estudio es la del N con $5,1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$.

Al comparar los valores encontrados de ingreso y egreso de elementos químicos en los ecosistemas se constata que en San Eusebio existe una acumulación continua de todos los elementos estudiados, por lo cual resulta en un incremento en la estabilidad del ecosistema. En el caso de los ecosistemas de Santa Fé (20) y El Verde (42) los egresos son más altos que los ingresos, resultando así una pérdida continua de elementos.

La importancia de transferencia de elementos químicos en el ciclo biogeoquímico de ecosistemas y cuencas hidrográficas ha sido descrita en detalle por Brinkmann (6), bajo diferentes condiciones de la región amazónica central (formaciones terciarias cerca de Manaus). En el Cuadro 3.5 se presentan los valores de pH y las concentraciones de elementos nutritivos y sustancias húmicas del agua de lluvia, de los ríos y del agua freática de diferentes ecosistemas.

La composición química del agua de lluvia sufre cambios notables al lixiviar por los ecosistemas y especialmente por los suelos y aparecer en el agua freática. Todos los procesos de intercambio nutricional se reflejan notablemente al comparar especialmente el contenido de sustancias húmicas en aguas "claras" y "negras" de los ríos de cuencas hidrográficas con suelos y vegetaciones diferentes.

3.4. El agua en agroecosistemas y sistemas agroforestales

3.4.1. Necesidades de agua

El balance hídrico de agroecosistemas (2, 9, 13, 39, 44) es, al igual que en los ecosistemas naturales, el resultado de las interacciones entre:

- las fuentes de ingreso de agua al sistema representada por el agua de lluvia o en casos específicos por el agua de irrigación y
- las fuentes de pérdida de agua por lixiviación y evapotranspiración.

En el marco de estas interacciones el suelo juega con su capacidad de almacenaje de agua disponible, un papel muy importante en función del tiempo y el espacio, regulando en forma definitiva el proceso de absorción de agua por las plantas.

Cuadro 3.5. El pH y la concentración de elementos nutritivos ($\text{kg} \cdot \text{l}^{-1}$) en el agua de diferentes ciclos biogeoquímicos de la Amazonia Central (según Brinkmann, 6).

	Río		Río		Suelo		Suelo		Suelo	
	Lluvia	Blanco	Negro	Negro	latosol hidromórfico	podsol bosque campina	latosol podélico	latosol bosque campina	latosol podélico	latosol vegetación secundaria
pH	4,70	5,10	3,70	3,70	5,40	3,5	4,50	3,5	4,50	4,50
Ca	tr,	tr,	tr,	tr,	tr,	tr,	tr,	tr,	tr,	tr,
Mg	5,00	130,00	20,00	20,00	128,00	18,00	239,00	18,00	239,00	239,00
Nt	143,00	320,00	701,00	701,00	2327,00	1099,00	1899,00	1099,00	1899,00	1899,00
Pt	15,00	10,00	57,00	57,00	50,00	53,00	28,00	53,00	28,00	28,00
Fe	23,00	410,00	139,00	139,00	35,00	68,00	28,00	68,00	28,00	28,00
Mn	tr,	54,00	27,00	27,00	12,00	tr,	0,00	tr,	0,00	0,00
Sustancias húmicas	0,00	8,50	93,10	93,10	25,00	74,00	1,00	74,00	1,00	1,00

tr. = valores bajo nivel analítico, trazas.

3.4.2. Ciclo del agua en sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales se caracterizan por la integración de varias especies en un suelo en función del tiempo y el espacio (ver Capítulo 2); de ello resulta una utilización más exhaustiva del agua disponible del suelo que en un monocultivo. Las condiciones de evaporación son muy diferenciadas en función de las características climáticas (temperatura, humedad, humedad relativa, viento) dentro del sistema; los diferentes estratos de la vegetación determinan una transpiración diferenciada específica (sistema radicular, biomasa de hojas, actividad fotosintética y transpiratoria). Así la evapotranspiración, como fuente de pérdida de agua y su transferencia a la atmósfera es suí generis. El suelo juega un papel muy importante ya que almacena el agua a utilizarse y refleja en el tiempo y en el espacio la situación cambiante de las reservas de agua en función de balance hídrico (13, 32, 33, 34, 49, 50).

En la Figura 3.5 se presentan esquemáticamente los procesos hídricos en sistemas agroforestales tal como fue publicado por Imbach *et al* (33, 34). El flujo de agua comienza con el ingreso de la misma al sistema, a través de las lluvias (Pr). Esta puede atravesar directamente el dosel y llegar al suelo (Pd) o bien, puede depositarse en el follaje de las plantas para permanecer en él y luego evaporarse -intercepción (In)- o bien, gotear o deslizarse por las hojas, ramas y/o troncos hasta el suelo (Go). El agua que llega al suelo se infiltra en el mismo y desde allí puede seguir uno o más de los siguientes caminos: a) permanecer en el suelo, variando su contenido de humedad (Hs); b) ser absorbida por las raíces de las plantas (Ab) y luego transpirada (Tr); c) moverse en forma lateral como escorrentía superficial (Es); d) moverse verticalmente en dirección descendente saliendo del sistema como agua de percolación (Pe), al sobrepasar la capacidad de campo del suelo. Con esta última opción se lixivian elementos nutritivos (LM). La ecuación del balance hídrico del suelo se puede formular de la siguiente manera (13, 22, 33, 34):

$$Pr = In + Tr + Es + Pe \pm Hs$$

Las condiciones específicas de evaporación y transpiración de los sistemas agroforestales son diferentes, de acuerdo con sus características microclimáticas (temperatura, humedad, viento) las que son influidas por la arquitectura de la vegetación, el sistema radicular, la biomasa de hojas, la actividad fotosintética, etc. de terminando una transpiración específica para cada sistema.

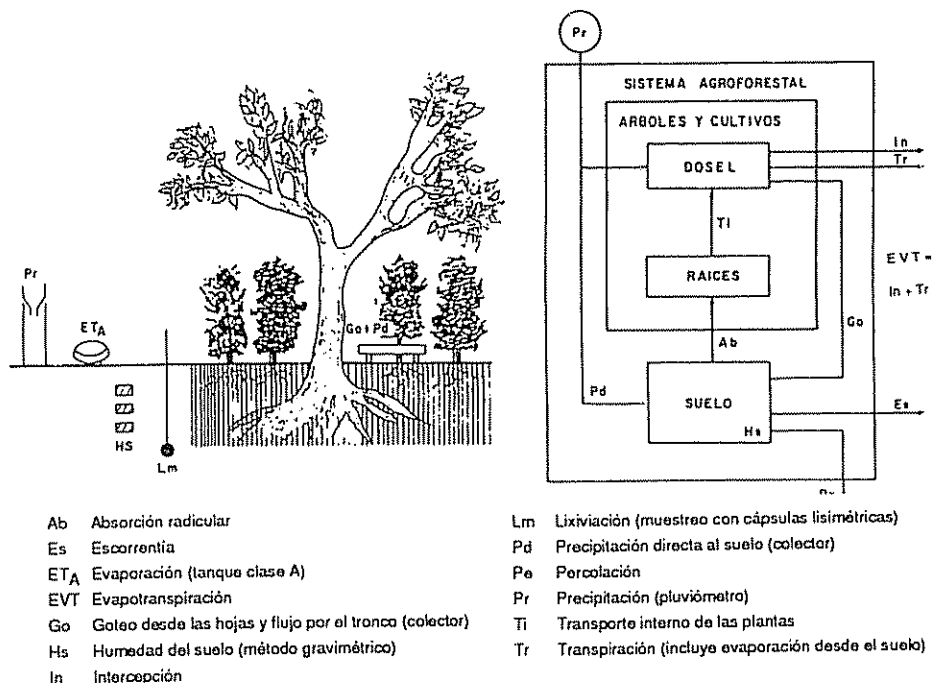


Figura 3.5. Ciclo del agua en sistemas agroforestales y medición de sus variables (según Imbach et al 32).

Existen pocos estudios parciales o totales sobre el ciclo del agua en sistemas agroforestales. Un primer antecedente al respecto son las investigaciones de Franco e Inforzato (18) en Brasil, quienes determinaron 593 mm/a de evapotranspiración para el monocultivo de *C. arabica* y 1 120 mm/a en la asociación de éste con *Inga edulis*. Poco después, en un estudio a largo plazo hecho en cafetales de Kenia, bajo irrigación, Pereira (43) determinó los siguientes valores para el balance hídrico: lluvia: 973 mm/a, evaporación: 1 532 mm/a, transpiración: 826 mm/a, lixiviación: 131 mm/a. En un estudio integral de agroecosistemas cafetaleros en México, Jiménez (34) determinó varios componentes del balance hídrico, calculando valores de evapotranspiración que alcanzaron 1327 mm/a en el caso de cultivo al sol, 1 052 mm/a en el cultivo mixto con *Inga jinicuil* (jinicuil), *Inga leptoloba* (chalahuite), naranjo (*Citrus sinensis*) y plátano (*Musa sapientum*), y 703 mm/a bajo sombra de árboles de chalahuite (*Inga leptoloba*). A su vez, Doorenbos y Prunit (9) consideran que la evapotranspiración en cultivos de café oscila entre 800 y 1 200 mm/a, y la de los árboles de sombra (caducifolios) entre 700 y 1 050 mm/a.

La información sobre las necesidades de agua de las especies tropicales y subtropicales de agroecosistemas es muy dispersa y escasa. En la publicación exhaustiva de Doorenbos y Pruit (9), revisando la literatura mundial, se ha encontrado el ámbito general estimativo de la evapotranspiración, los diferentes cultivos presentados en el Cuadro 3.6. En función de esos valores se pueden calcular también los valores promedios diarios de evapotranspiración de los cultivos; p.e. (mm.d⁻¹):

Café	2,2	a	3,3
Cacao	2,2	a	3,3
Naranjas, toronjas	1,8	a	2,7
Maíz	1,1	a	1,9
Caña de azúcar	2,7	a	4,1
Arboles deciduos	1,9	a	2,9

Estos valores permiten una orientación global de las necesidades de agua de los cultivos. Para describir el balance hídrico de un agroecosistema son sin embargo, mediciones específicas de todos los parámetros involucrados en el ciclo de agua. En los próximos acápites se presentarán algunos ejemplos

Cuadro 3.6. Valor aproximado de la evapotranspiración anual (mm) de algunos cultivos (según Doorenbos y Pruit, 9)

Alfalfas	600	1.500
Bananos	700	1.700
Frijoles	250	400
Cacao	800	1.200
Café	800	1.200
Algodón	500	950
Dátiles	500	1.300
Arboles deciduos	700	1.050
Granos (peq.)	300	450
Toronjas	650	1.000
Maíz	400	700
Semillas	300	600
Cebollas	300	600
Naranjas	600	950
Papas	350	625
Arroz	500	800
Henequén	550	800
Sorgo	300	650
Soja	450	825

Continuación Cuadro 3.6.....

Remolachas	450	850
Caña de azúcar	1.000	1.500
Camotes	400	675
Tabaco	300	500
Tomates	300	600
Vegetales	250	500

Estudios sobre el balance hídrico de sistemas agroforestales se han realizado en los últimos años en el Experimento Central del CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) en Turrialba, Costa Rica, dentro del Proyecto Agroforestal GTZ*. Los objetivos generales del experimento son (Enríquez, 10):

1. Comparar, por varios métodos, los sistemas agrícolas de plantas perennes más comunes en la zona, incluyendo cultivos de ciclo corto y medio.

2. Estudiar en forma detallada el medio ambiente (ecosistema) de cada uno de los sistemas agrícolas comparados en su evolución y transformación durante el tiempo que dure el experimento.

En función de los trabajos de investigación realizados por el Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ se inició en 1981 una serie de estudios dentro del mismo experimento. Se trata de mediciones del ciclo del agua, materia orgánica y elementos nutritivos de sistemas agroforestales (1, 13, 14, 26, 32, 33). De los 18 tratamientos originales del experimento se han escogido los siguientes sistemas agroforestales para los estudios del ciclo del agua:

- Cacao (Theobroma cacao) con poró (Erythrina poeppigiana)
- Cacao (Theobroma cacao) con laurel (Cordia alliodora)
- Café (Coffea arabica) con poró (Erythrina poeppigiana)
- Café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora)

En el caso del sistema de cacao con poró o laurel la fecha de siembra de los cultivos fue en agosto de 1977. Se plantaron tres híbridos de cacao que son: 1-Catongo x Pound 12, 2-EET-400 x SCA-12, 3-UF-29 x IMC-67; de los cuales el híbrido Catongo x Pound 12

* Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (Sociedad Alemana de Cooperación Técnica), Eschborn, Rep. Federal de Alemania.

constituye siempre la parcela efectiva con 16 plantas y los otros forman los bordes de la parcela, el número total de plantas por parcela es de 36, o sea una densidad de 1111 plantas.ha⁻¹, para una distancia de siembra de 3 x 3 m. Aquí también se utilizó (Musa spp. c.v. Pelipita) a razón de nueve plantas por parcela o sea 278 plantas.ha⁻¹ para una distancia de siembra de 3 x 3 m. Aquí también se utilizó (Musa spp. c.v. Pelipita) a razón de nueve plantas por parcela o sea 278 plantas.ha⁻¹, la razón principal por la que se sembró es porque ayuda a la propagación de insectos que polinizan el cacao. La especie de laurel es Cordia alliodora (Ruiz / Pavon) Oken, el número total de árboles efectivos por parcela es de nueve o sea 278 plantas.ha⁻¹, para una distancia de siembra de 6 x 5 m. El poró utilizado es Erythrina poeppigiana, a razón de nueve árboles efectivos por parcela o sea 278 árboles.ha⁻¹, para una distancia de siembra de 6 x 6 m. Los árboles de poró se podaron por vez primera en agosto de 1981 y luego dos veces en 1982, la biomasa de las podas permanece en la parcela como "mulch". Después no se han realizado podas. Los detalles de la fertilización del experimento han sido descritos por Alpizar et al (1).

Para el sistema de café con poró y café con laurel la fecha de siembra de los cultivos fue en agosto de 1977, igualmente. La variedad de café utilizada es el Híbrido de Timor, el número total de plantas por parcela es de 162, o sea una densidad de 5,000 plantas.ha⁻¹, sembradas a 1 x 2 m. El laurel es Cordia alliodora (Ruiz / Pavon) Oken, el número total de árboles efectivos por parcela fue de nueve, o sea, 278 árboles.ha⁻¹, para una distancia de siembra de 6 x 6 m.

El poró utilizado es el Erythrina poeppigiana, a razón de 18 árboles efectivos por parcela o sea 555 árboles.ha⁻¹, para una distancia de siembra 3 x 6. Según los datos de campo los árboles de poró se han podado dos veces al año desde 1981, la biomasa de las podas queda en la parcela como "mulch".

Para describir el ciclo hidrológico de esos sistemas agroforestales se han realizado las siguientes mediciones diarias (32, 33).

- La lluvia en las cercanías del experimento utilizando un pluviógrafo de registro continuo.
- La intercepción se determinó como diferencia entre la lluvia a cielo abierto y el agua que llega al suelo bajo la cubierta vegetal del sistema estudiado. Para ello, se utilizaron canaletas construidas con tubos de PVC rígidos, de 3m de longitud y de 25 cm de diámetro, cortados longitudinalmente

por una secante de 15 cm de ancho, resultando así una superficie total de recolección de 0.5 m². Se colocaron cuatro aparatos por sistema en estudio, sobre soportes de madera de 45 cm de altura y con una pendiente constante de 2 %. Durante seis meses (setiembre 1986 a febrero 1987), se realizaron observaciones en 33 eventos de lluvias. Los volúmenes de agua recogidos en los colectores se transformaron en valores de precipitación bajo el dosel, para cada uno de los sistemas estudiados. La interceptación promedio se determinó para cada lluvia y sistema. Con base en estas observaciones, se construyeron gráficos de interceptación en función de la precipitación a cielo abierto. Atendiendo a las consideraciones de los modelos de interceptación de Rutter *et al* (47, 48), las observaciones de interceptación se ajustaron a una función cuadrática de la precipitación a cielo abierto. En la primera parte de la curva, la interceptación aumenta paulatinamente a medida que se incrementa la precipitación, hasta llegar a un punto máximo, a partir del cual se mantiene constante.

- El flujo por los troncos no fue determinado por considerarse que su magnitud es pequeña (13, 22) y su determinación muy costosa. La escorrentía superficial no existió bajo las condiciones del estudio ya que el experimento se estableció en una planicie.
- La humedad del suelo fue medida con frecuencia bisemanal (octubre 1983 a marzo 1987), por métodos gravimétricos (17, 19). Las muestras a distintas profundidades (0-15 cm, 15-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm) se obtuvieron usando un barreno de suelos; se tomaron cinco repeticiones por estrato y fecha de muestreo para cada uno de los sistemas en estudio. La profundidad de trabajo se estableció con base en un inventario de biomasa del sistema que incluyó la determinación de la densidad de raíces, hasta una profundidad de 45 cm mediante muestreo por barrenamientos. Este trabajo estableció que la biomasa de raíces disminuye notablemente con la profundidad, siendo casi nula su presencia en la capa de 30 a 45 cm. Entonces, se consideró razonable adoptar una profundidad de perfil explorable por las raíces de 90 cm. Sin embargo, es necesario expresar que podrían existir raíces que superen el nivel adoptado, ya que no existe una investigación detallada de los sistemas radicales existentes en el sitio.

- La percolación se calculó mediante un programa de simulación con computadora.

En el Cuadro 3.7 se presentan los valores de la curva de tensión de agua para las diferentes profundidades estudiadas y el agua disponible en la profundidad respectiva. Los valores de agua capilar de drenaje rápido (0,2 a 0,3 bares) son altos. El agua disponible oscila entre 8,0 y 16,3 % entre las diferentes profundidades. El agua total disponible en el perfil del suelo (0-90 cm) alcanzó un total de 114 mm ó 1.14 m^3 ; este valor se considera alto y refleja la textura del suelo franco-arcilloso y franco-arcillo-limoso.

A manera de ejemplo se presenta en la Figura 3.6 la curva de interceptación del agua de lluvia para los sistemas de cacao bajo sombra de poró (E. poeppigiana) y de laurel (C.alliodora). La interceptación máxima de los sistemas es de 2,5 y 3,2 mm respectivamente. Ello se debe al manejo del dosel de E. poeppigiana el cual es podado cada seis meses.

En la Figura 3.7 se presentan las variaciones del contenido de agua en el suelo durante un año de estudios de setiembre 1983 a setiembre 1984). Analizando la Figura 3.7 puede verificarse que en la capa superficial (0-15 y 15-30 cm de profundidad), la absorción de agua por las raíces hace que la humedad del suelo disminuya hasta valores correspondientes a tensiones del orden de 200 kPa. Sin embargo, la ocurrencia de lluvias (por ejemplo, entre el 21 de febrero y el 5 de marzo) conlleva un aumento del contenido de agua en esta capa (33, 34).

Las curvas de humedad en el subsuelo, a profundidades de 30 a 60 cm y especialmente de 60 a 90 cm, muestran que el suelo a estas profundidades está a capacidad de campo (tensión entre 20 y 30 kPa). De esta forma, el agua que percola de las capas superiores se convierte íntegramente en agua freática.

La Figura 3.8 muestra a manera de ejemplo los resultados de contenido total de agua del suelo (mm) obtenidos con el modelo de simulación, empleando los valores más adecuados de k_c y de tensión de agua correspondiente a capacidad de campo para ambos sistemas. Dichos valores fueron (32, 33):

C.arabica/E. poeppigiana: k_c : 0,8. Tensión: 0,33 bares

C.arabica/C.alliodora: k_c : 0,7. Tensión: 0,33 bares

Cuadro 3.7. Curva de tensión de agua y agua disponible en los suelos del Experimento Central de CATIE, Turrialba, Costa Rica (32).

Profundidad (cm)	Contenido de agua % en						agua disponible		profundidad (mm)
	15	5	2	1	0.33	0.2	% agua disponible		
	bares	bares	bares	bar	bar	bar	disponible		
0-15	31,0	32,6	34,9	37,9	40,7	48,9	16,3	24,5	
15-30	31,1	35,2	37,0	40,7	44,0	45,5	10,3	15,5	
30-45	25,7	31,2	32,8	39,8	42,1	46,9	15,7	23,6	
45-60	29,5	33,6	36,3	39,3	41,4	49,6	16,0	24,0	
60-75	34,2	35,8	37,8	39,9	42,2	45,2	9,4	14,1	
75-90	38,5	40,4	41,8	44,4	46,8	48,4	8,0	12,0	

Agua disponible total (mm. ó l.m⁻²): 113,7

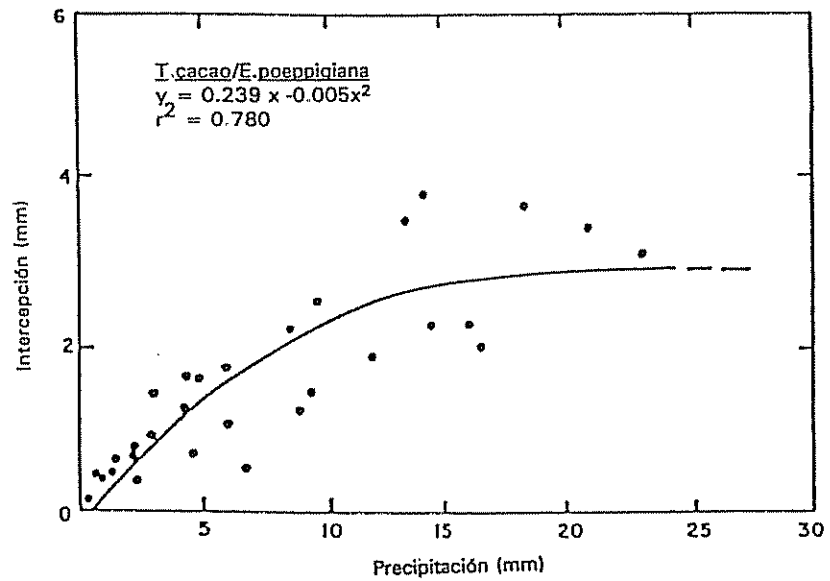
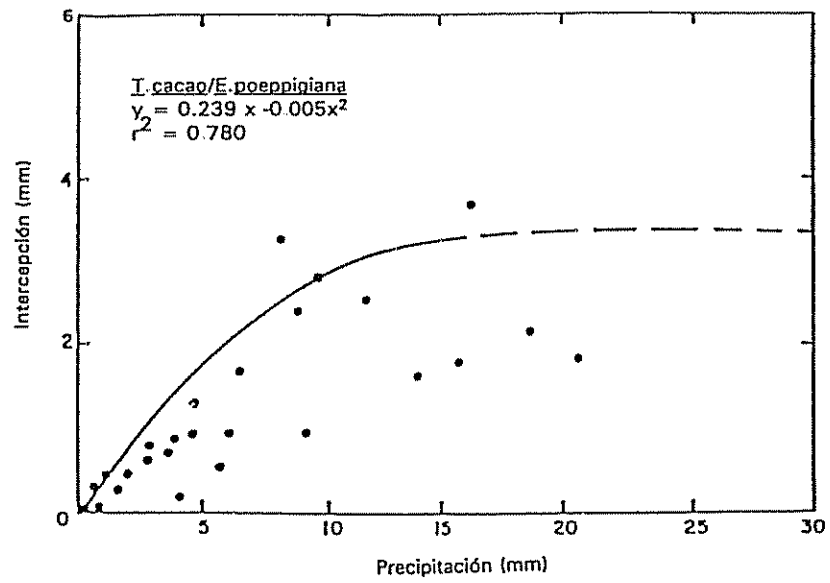


Figura 3.6. Correlación entre intercepción y precipitación en los sistemas I. cacao y C. alliodora o E. poeppigiana (Imbach et al, 32).

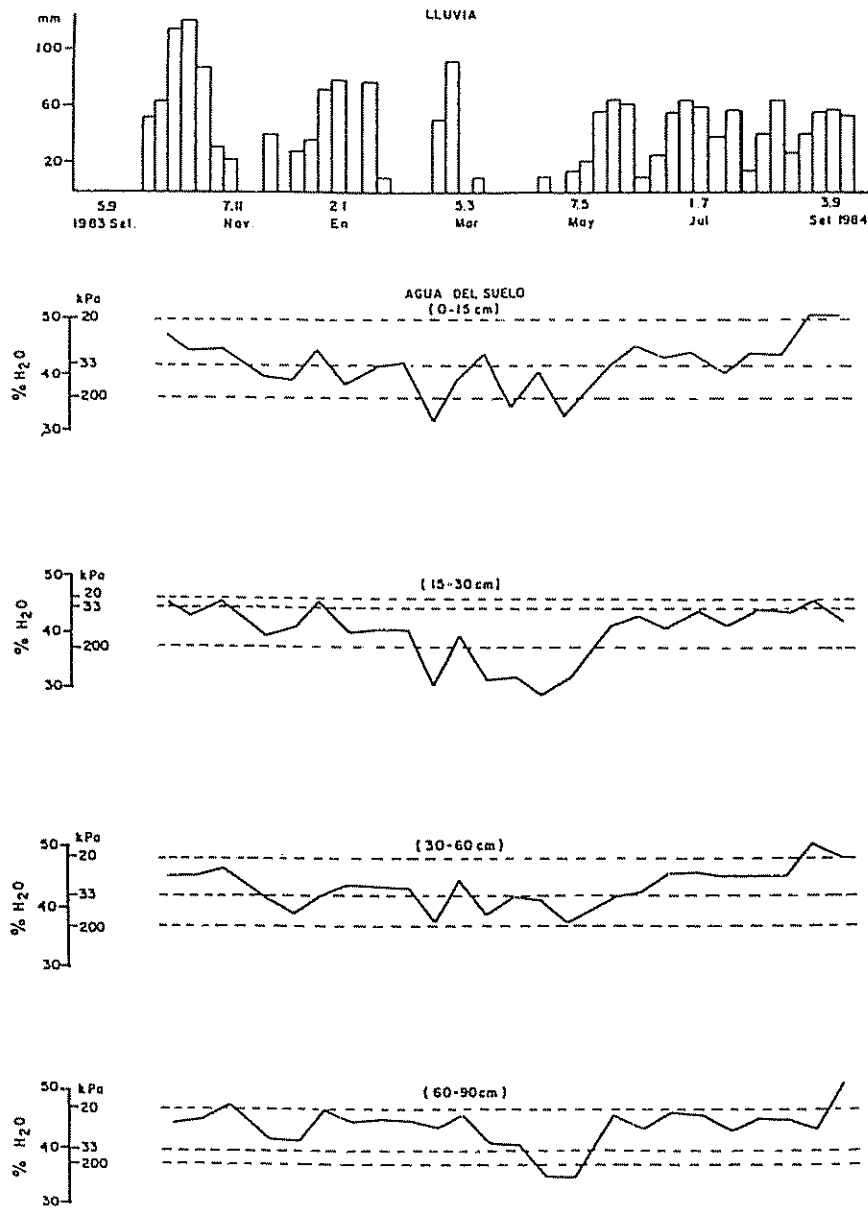


Figura 3.7. Variación anual de la lluvia y del contenido de agua en el suelo de un sistema agroforestal de café con laurel en Turrialba, Costa Rica (Imbach *et al*, 32).

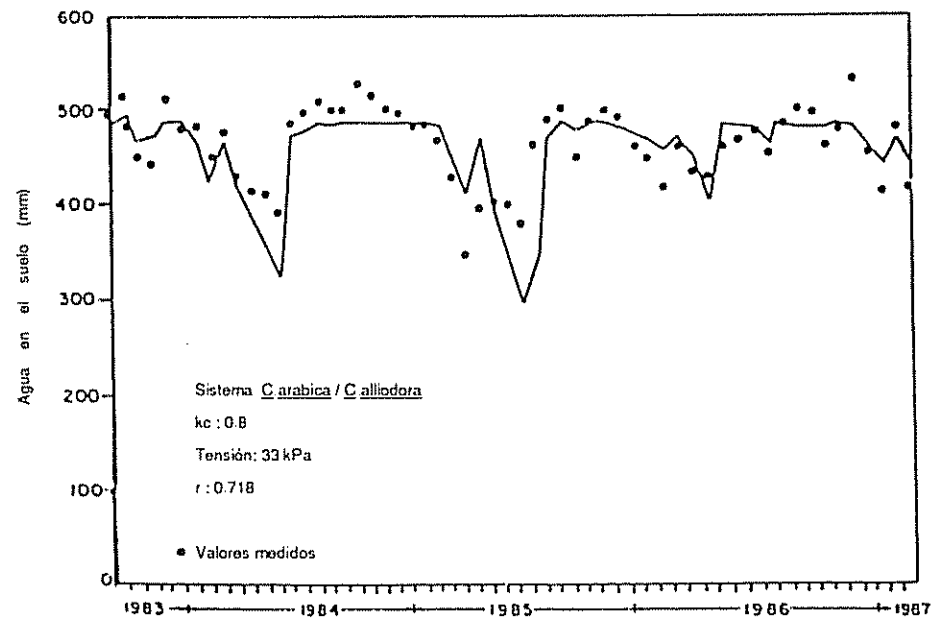
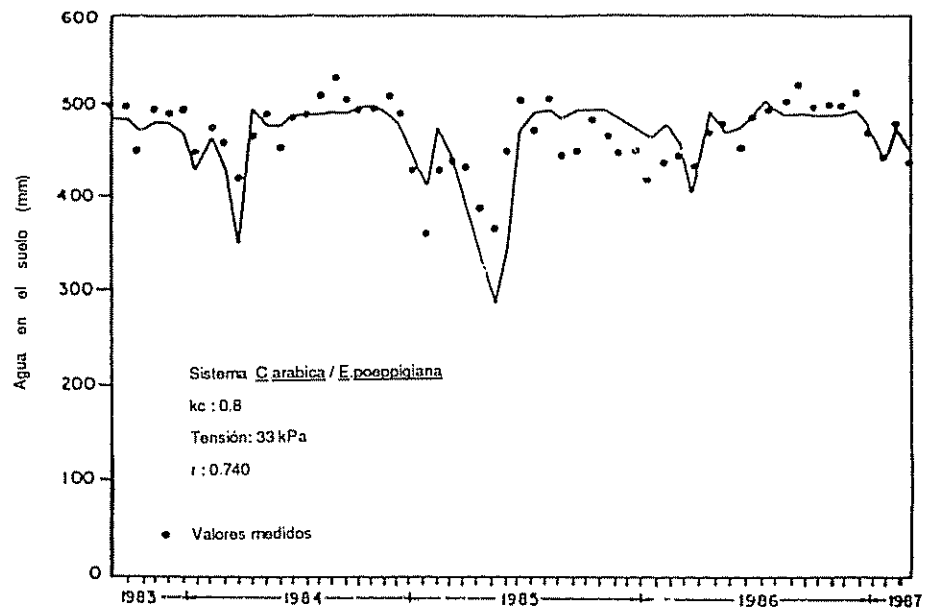


Figura 3.8. Ajuste del modelo de balance hídrico de los sistemas agroforestales estudiados (Imbach *et al.*, 32).

Los coeficientes de correlación entre los contenidos de agua medidos y estimados son buenos (C. arabica/E. poeppigiana: 0,740 y C. arabica/C.alliodora: 0,718).

En el período marzo 1986 a marzo 1987, las cantidades absolutas de transpiración fueron diferentes, alcanzando 811 mm/a (42,2% de las lluvias) en el sistema C. arabica/E poeppigiana y 702 mm/a (36,5% de la lluvia) en C. arabica/C. alliodora (Cuadro 3.8). El manejo del dosel superior mediante podas parece tener un papel importante en el balance hídrico de los sistemas agroforestales estudiados. La poda semestral de E. poeppigiana origina un aumento de la temperatura y del viento en el estrato del café, lo cual activa la absorción de agua, tal como ha sido señalado por distintos autores (3, 18).

Los valores absolutos de evapotranspiración de los dos sistemas estudiados presentan poca diferencia:

- C. arabica/E. poeppigiana 915 mm.a⁻¹ 1000 mm/a
- C. arabica/C. alliodora 1000 mm.a⁻¹
- T. cacao/E. poeppigiana 1002 mm.a⁻¹
- T. cacao/C. alliodora 1027 mm.a⁻¹

Cuadro 3.8. Balance hídrico de sistemas agroforestales estudiados en Costa Rica, período octubre 1983 a setiembre 1987, precipitación anual 2004 mm (Imbach et al., 32).

	Café/ Poró	Café/ Laurel	Cacao/ Poró	Cacao/ Laurel
Lluvia	100,00	100,00	100,00	100,00
Intercepción mm	70	270	294	320
%	3,5	13,5	14,6	16,0
Transpiración mm	845	730	707	707
%	42,2	36,5	35,4	35,3
Evapotranspiración mm	915,00	1001	1002	1027
%	45,7	50,0	50,0	51,3
Percolación mm	1086	1000	999	974
%	54,3	50,0	50,0	48,7

En este comportamiento influyen dos procesos contrapuestos; la interceptación resulta mayor en el sistema con *C. alliodora*, tal como se ha descrito, proceso que se compensa por la mayor transpiración del sistema con *E. poeppigiana*, obteniéndose así valores similares de evapotranspiración total. También resulta importante destacar que las diferencias, en ambos procesos, están ligadas a las mismas causas: el distinto manejo de la copa de los árboles asociados al cultivo y las distintas características de la copa y hojas de ambas especies arbóreas.

La percolación fue estimada por el modelo en

- *C. arabica*/*E. poeppigiana* 1086 mm.a⁻¹
- *C. arabica*/*C. alliodora* 1000 mm.a⁻¹
- *T. cacao*/*E. poeppigiana* 949 mm.a⁻¹
- *T. cacao*/*C. alliodora* 974 mm.a⁻¹

El balance hídrico de plantaciones de café en Kenia fue estudiado a largo plazo por Pereira (43), los resultados obtenidos se suman en el Cuadro 3.9. El régimen pluvial es heterogéneo, oscilando en seis años de observaciones entre 711 y 1422 mm. La evaporación medida en un tanque abierto (class-A-pan) alcanzó en promedio 1532 mm. La utilización de agua por el sistema es más o menos constante, alcanzando en seis años un promedio 826 mm. Solamente en los años relativamente lluviosos se observa la lixiviación de agua.

Cuadro 3.9. Balance hídrico de cultivares de café (*Coffea arabica*) en Kenia (según Pereira, 43; seis años de estudio; 1.m⁻² ó mm).

Balance hídrico		Año de estudios						Promedio			
		1	2	3	4	5	6				
Lluvia	L	1422	1067	711	914	787	{}	973			
Evaporación	Eo	1575	1549	1600	1575	1524	1372	1532			
Absorción de agua	Et	711	940	838	737	864	864	826			
Lixiviación, agua freatica	Af	406	279	0	102	0	0	131			
Relación mensual Et/Eo											
E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0.5	0.5	0.5	0.8	0,8	0,7	0,7	0,6	0.5	0.5	0.7	0.6

En la Figura 3.9 se presenta la relación entre las lluvias y el contenido de agua en el suelo (0-320 cm) medidos cada diez días comparado con el contenido de agua calculado en base a los datos de evaporación. Se observa que los valores simulados tienen un ajuste muy cercano a los valores reales.

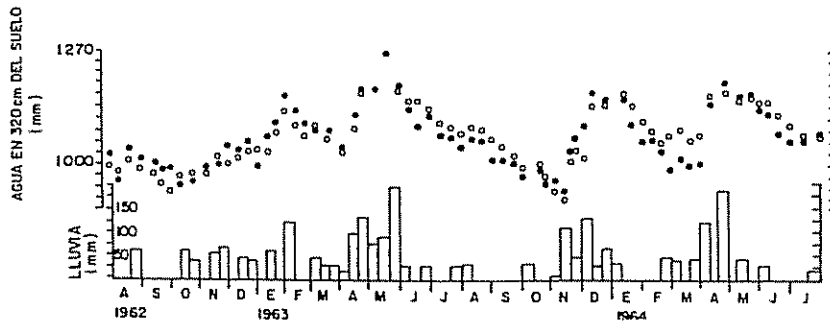


Figura 3.9. Contenido de agua del suelo calculado en base a los valores de evaporación (°) y determinado (°) bajo un sistema agroforestal de café en Kenia (según Pereira, 43).

En el Cuadro 3.10, se presentan los resultados obtenidos por Ringoet (citado por Ferweda, 15) sobre el balance hídrico de una plantación de palma aceitera (150 palmeras de 11 años de edad por hectárea) en la región de Yangambi, Zaire. La interceptación foliar de las palmas aceiteras es relativamente pequeña (7 % de 1950 mm, de lluvia en función del distanciamiento entre plantas. La transpiración por las plantas al sistema, tanto palmas aceiteras como de cobertura del suelo, alcanzaron un valor de 1073 mm, equivaliendo en promedio a $2,9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$. Los autores consideran que bajo estas condiciones se tiene un déficit de agua para las palmas aceiteras.

Cuadro 3.10. Balance hídrico en una plantación de palmera aceitera de 11 años en Yangambi, Zaire (según Ringoet, citado por Ferweda, 15; mm).

Entrada de agua		Pérdidas de agua	
Lluvia	1875	Intercepción (evaporación foliar)	131
Rocío y niebla	75	Transpiración palmas	400
		Transpiración plantas de sotobosque	673
		Evaporación del suelo	307
		Escrurrimiento lateral y lixiviación	439
TOTAL	1950		1950

3.4.3. Elementos nutritivos en la solución del suelo de sistemas agroforestales

El estudio de la concentración de elementos nutritivos en la solución del suelo es importante ya que ella representa la fuente disponible de nutrimentos para las plantas. Estas concentraciones dependen de las características químicas intrínsecas del suelo, tales como el contenido total, mineralizable (N, P, S) y cambiante (K, Ca, Mg) de elementos nutritivos, el valor del pH, la producción y descomposición de residuos vegetales, las condiciones microbiológicas y los procesos de intercambio en el suelo, de las variaciones periódicas del contenido del agua (efecto de dilución) y finalmente de los procesos de absorción de elementos nutritivos por las plantas.

Estos aspectos fueron también estudiados en los sistemas agroforestales del Experimento Central del CATIE, Turrialba, Costa Rica, descritos en el acápite anterior. Para obtener muestras de agua del suelo se instalaron en forma radial 20 cápsulas de cerámica a diferentes profundidades (15 m y 30 m) a una distancia de 50 y 100 m de distancia del tallo de un árbol de poró (*Erythrina poeppigiana*) y de laurel (*Cordia alliodora*) asociados con cacao (*Theobroma cacao*).

Los valores mensuales y su promedio anual obtenidos para los elementos nitrógeno, potasio, calcio y magnesio durante un año de estudios se han sumariado en el Cuadro 3.11. Se observa que las concentraciones de esos elementos en el agua del suelo alrededor de los árboles de poró son más elevados que las de los árboles de laurel. Para interpretar las diferencias en el N es necesario mencionar que el poró es un árbol leguminoso con capacidad de fijación de nitrógeno, el cual en función de la fenología de las plantas puede aparecer en la solución del suelo. Las diferencias en las diferentes profundidades son pequeñas, ellas implican que la actividad radicular y las demás características del suelo hasta los 30 cm de profundidad son muy similares. Los valores de K, Ca y Mg presentan variaciones importantes entre los meses, las tendencias son similares a las del N, encontrándose valores promedios más elevados en las cercanías del tronco del poró. Las variaciones estacionales de los elementos nutritivos en la solución del suelo fueron constatados en trabajos de Fassbender (12) en diferentes lugares de Costa Rica.

3.4.4. Lixiviación de elementos nutritivos en sistemas agroforestales

Para poder estudiar las pérdidas de elementos nutritivos con el agua de lixiviación es necesario conocer

- la cantidad de agua de percolación
- la concentración de elementos en el agua percolante

Estos detalles fueron estudiados igualmente en el Experimento Central del CATIE en un lapso de cuatro años para los sistemas agroforestales de café bajo poró o laurel y de cacao bajo los mismos árboles de sombra.

La solución que contiene los nutrimentos lixiviados fue muestreada mediante el uso de cápsulas lisimétricas de 20 mm de diámetro externo y 60 mm de longitud colocadas en el suelo a 100 cm de profundidad, usando ocho repeticiones por sistema agroforestal estudiado. Tanto para la obtención del vacío como para la extracción de la muestra se empleó una bomba de vacío de mano, con un manómetro incorporado para obtener un vacío constante (80 kPa), en todas las cápsulas, a través del período de muestreo.

La toma de muestras comenzó el 15 de marzo de 1984 y se prolongó hasta el 15 de marzo de 1987, cubriendo un período de tres años. La frecuencia de muestreo fue semanal.

Las muestras obtenidas se condujeron al laboratorio donde se procedió a unir las muestras semanales en muestras quincenales, efectuándose las determinaciones analíticas en estas últimas. A fin de evitar alteraciones durante la espera, hasta el momento de ser unidas, las muestras fueron almacenadas a -20°C.

Cuadro 3.11. Concentración de elementos nutritivos en la solución del suelo alrededor del tronco de árboles de poró y laurel asociados con cacao en Turrialba, Costa Rica ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$) (datos no publicados).

	Poró (<i>Erythrina</i>)	Laurel (<i>Cordia</i>)	
Nitrógeno, 0-30 cm	23,2	9,3	
0-15 cm		26,5	9,3
15-30 cm		20,1	9,7
Potasio, 0-30 cm		5,9	2,6
Calcio, 0-30 cm		8,9	2,5
Magnesio, 0-30 cm		6,0	1,8

Cuadro 3.12. Concentración de elementos nutritivos en el agua de lixiviación en sistemas agroforestales estudiados en Turrialba, Costa Rica (promedio de 200-238 muestras por elemento, mg.l^{-1}) (según Imbach *et al.*, 32).

	N	P	K	Ca	Mg
Café/poró	0,55	0,06	0,17	2,15	1,52
Café/laurel	0,60	0,06	0,21	0,69	0,76
Cacao/poró	0,57	0,05	0,17	2,46	2,19
Cacao/laurel	0,58	0,05	0,14	0,55	0,67

Las concentraciones de N y P de los sistemas estudiados no presentan diferencias significativas ($\alpha = 0,05$). Las concentraciones de Ca y Mg son más elevadas (Cuadro 3.12) en el sistema *C. arabica/E. poeppigiana* y *T.cacao/E. poeppigiana*.

En la Figura 3.10 se presentan las variaciones de las concentraciones de N en el agua de lixiviación registradas en sistemas del café a lo largo del período de estudio. Los niveles las mismas fueron similares en ambos sistemas. El análisis de las covariables consideradas mostró que las variaciones observadas no están relacionadas con el ingreso de N con la hojarasca, la intensidad de las lluvias o la distancia a los árboles. Sin embargo, se registró, una influencia significativa de la covariable poda/fertilización química sobre la concentración de nitrógeno en la solución de lixiviación.

Asimismo, la Fig. 3.10 muestra las variaciones estacionales de la concentración de Ca en el agua de lixiviación de ambos sistemas de café. En este caso, se observó que dicha concentración fue mucho mayor y más variable en el sistema con *E. poeppigiana* que en el sistema con *C. alliodora*. La influencia de las covariables consideradas es similar al caso del nitrógeno, aunque la influencia de poda/fertilización es menos marcada ($0,90 < P < 0,95$).

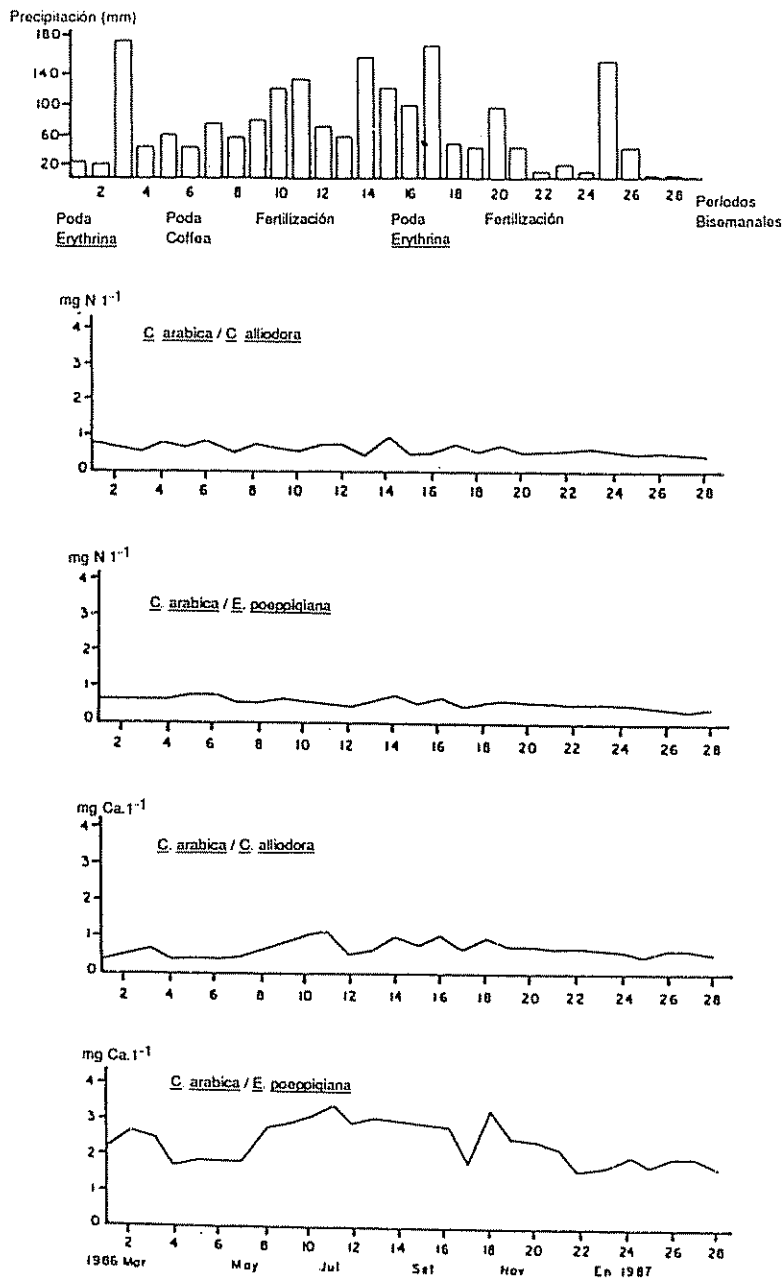


Figura 3.10. Variación de las concentraciones de N y Ca en el agua percolante de los sistemas café/poró y café/laurel (mg.l⁻¹; Imbach *et al.*, 32).

Cuadro 3.13. Lixiviación de elementos nutritivos en sistemas agroforestales de café y cacao con sombra de poró o laurel (1983-1987) ($\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$; Imbach *et al.*, 32).

	N	P	K	Ca	Mg
Café/poró	6,02	0,70	1,84	23,39	16,54
Café/laurel	6,03	0,55	2,15	6,92	7,64
Cacao/poró	5,70	0,50	1,70	24,61	21,96
Cacao/laurel	5,60	0,52	1,40	5,40	6,50

A manera de ejemplo se puede interpretar que las pérdidas de N, P y K en sistemas de *C. arabica* son relativamente pequeñas, aproximadamente de $6,0 \text{ kg/ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, $0,7 \text{ kg/ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ y $2,0 \text{ kg/ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ respectivamente (Cuadro 3.13). Estas pérdidas son de poca importancia en su aspecto agronómico, en particular cuando son comparadas con la fertilización de 80 kg N, 105 kg P_2O_5 y 66 kg K_2O por hectárea y por año y las reservas totales de estos elementos en los suelos que fueron de 8500 kg/ha^{-1} de N, 2800 kg/ha^{-1} de P y 650 kg/ha^{-1} de K en los primeros 45 cm del suelo (2).

Las pérdidas de Ca y Mg son de mayor magnitud e importancia, especialmente en el sistema con *E. poeppigiana*, ya que ellas cuadruplican los valores registrados en el otro sistema. Sin embargo, comparando las tasas de lixiviación de Ca de ambos sistemas con sus reservas en los primeros 45 cm de suelo (2835 kg/ha^{-1} en el sistema con *E. poeppigiana* y $2783 \text{ kg Ca/ha}^{-1}$ en el sistema con *C. alliodora* (2, 14), se desprende que ellas tampoco son muy graves.

De todas las pérdidas observadas, las de magnesio en el sistema con *E. poeppigiana* son las únicas que pueden considerarse como atendibles por su magnitud ($16,5 \text{ kg/ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$), ya que implicarían, si todo transcurriese linealmente, que en 35 años podría agotarse el magnesio de los primeros 45 cm del suelo cuyo valor es de 573 kg/ha^{-1} (2, 14). Sin embargo y a igual que en el caso del calcio, la reposición de las pérdidas de este nutrimento por fertilización en las cantidades citadas no constituye problema alguno, ni técnico ni económico.

Esta característica es muy interesante ya que pone de relieve un aspecto positivo muy importante, desde la perspectiva de los sistemas de producción sostenibles y de bajos insumos, como alternativa productiva para los agricultores del trópico.

3.4.5 Competencia por agua y cosechas en sistemas agroforestales

Existen muy pocos estudios sobre la competencia por agua y elementos nutritivos entre los árboles y los cultivos involucrados en sistemas agroforestales. Huxley (29) ha desarrollado sistemas de computación para describir los sistemas radiculares, especialmente en su interfase con los cultivos.

En un estudio reciente de Malik y Sharma (40) se analizó la absorción de agua y la producción en un sistema agroforestal de *Eucalyptus tereticornis* de 3,5 años en bandas con trigo (*Triticum* spp.) o mostaza (*Brassica juncea*) bajo condiciones semiáridas de India. De acuerdo con la Figura 3.11, en una profundidad de 150 cm el eucalipto absorbe cinco veces más agua que la mostaza; la reducción de las cosechas de trigo o mostaza son notorias. Por ello los autores recomiendan a *E. tereticornis* para suelos en una tabla freática relativamente alta.

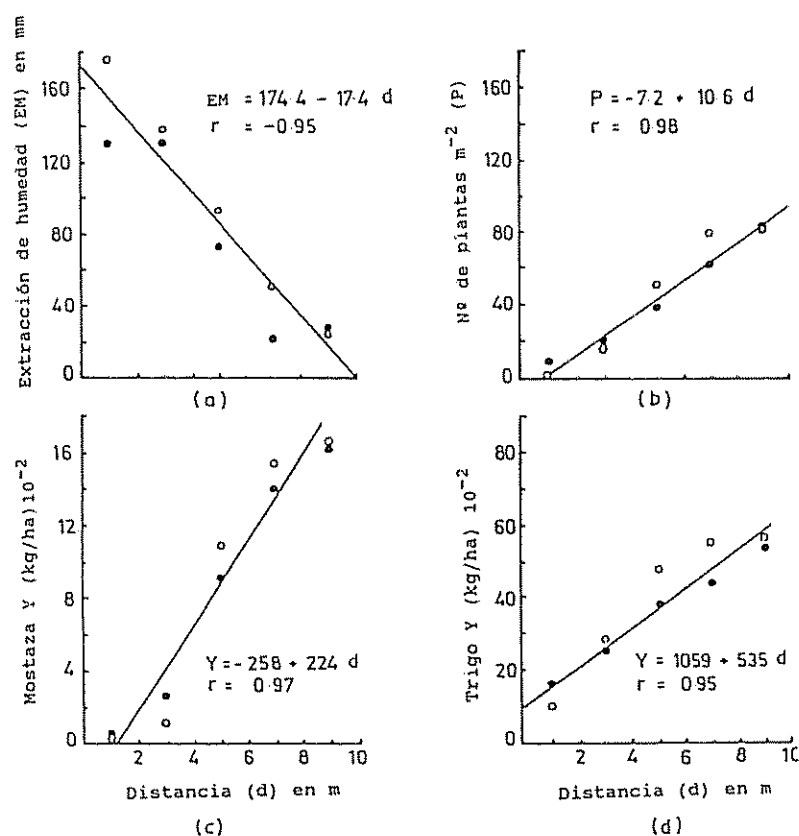


Figura 3.11. Relación entre la distancia de una hilera de árboles de eucalipto, d y: a. extracción de humedad para una profundidad de suelo de 0-150 cm, EM; b. número de plantas de mostaza/m², P; c. rendimiento Y de mostaza; d. rendimiento Y de trigo (Malik y Sharma, 40).

RESUMEN

- Se presenta el ciclo del agua en la naturaleza, discutiendo su importancia ecológica determinante de la vegetación, suelos y ecosistemas.
- Con los diagramas climáticos se caracteriza el régimen pluviográfico de un determinado lugar, se discuten los criterios necesarios para el balance hídrico.
- Para describir el agua en el suelo se detallan las constantes de humedad y los procesos de movimiento
- Se consideran las mediciones necesarias para describir el ciclo de agua en ecosistemas naturales forestales; a manera de ejemplo se presentan resultados obtenidos en el ecosistema de San Eusebio, Mérida, Venezuela.
- Con el agua se translocan en los ecosistemas cantidades importantes de elementos químicos, se evalúa en forma exhaustiva la información disponible para áreas tropicales y subtropicales.
- La información disponible sobre la necesidad de agua para las plantas cultivadas, es aún muy limitada. En la literatura casi no se encuentran ejemplos sobre el balance hídrico de agroecosistemas.
- Se discuten las bases de los estudios del ciclo de agua en sistemas agroforestales y se presentan los primeros resultados obtenidos en Turrialba, Costa Rica, para sistemas de café y cacao asociados con laurel (Cordia alliodora) y con poró (Erythrina poeppigiana).
- Se considera que el contenido de elementos nutritivos en la solución del suelo es importante y se presentan algunos resultados obtenidos sobre la lixiviación de elementos nutritivos.
- En la interfase del árbol/cultivo se diferencia la absorción de agua en forma muy notable la cual afecta notablemente las cosechas.

LITERATURA

1. ALPIZAR, L. et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) y café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. I. Biomasa y reservas nutritivas. Turrialba (C.R.) 35:233-242.
2. ALVIN, P. DE T.; KOZLOWSKI, T.T. 1977. Ecophysiology of tropical crops. New York, EE.UU., Academic Press. 502 p.
3. BARRADAS, V.L.; FANJUL, L. 1984. La importancia de la cobertura arbórea en la temperatura del agro-ecosistema cafetalero. *Biótica* (Méx.) 9(4):415-421.
4. BERNHARD-REVERSAT, F. 1975. Nutrients in throughfall and their quantitative importance in rain forest mineral cycles. In Tropical Ecological Systems. New York, EE.UU., Springer Verlag. p. 153-159.
5. BOYER, J. 1973. Cycles de las materie organique et des elements mineraux dans une cacoyere camerounaise. *Cafe, Cacao, The* (Francia) 17:2-23.
6. BRINKMANN, W.L.F. 1983. Ground water in water resources planning. In UNESCO-IAH-IAHS-Proceedings of an international symposium. s.l., Alemania, R.F., Koblenz. p. 67-83.
7. _____, 1984. Nutrient balance of a Central Amazonian rain forest. Symposium hydrology of the humic tropical regions. IAHS (Alemania, R.F.). Publication no. 140. p. 153-163.
8. CATIE (CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA). 1983. Datos meteorológicos del CATIE, 1942 - 1983. Turrialba, C.R., CATIE. p. irr.
9. DOORENBOOS, I.; PRUNIT, A. 1977. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper no. 24. 5 p.

10. ENRIQUEZ, G. 1979. Ensayo Central de cultivos perennes en comparación con algunos anuales. *In* Taller Sistemas Agroforestales en América Latina (1979, Turrialba, C.R.). Actas. Ed. por G. de las Salas. Turrialba, C.R., CATIE. 119-202 p.
11. ERIKSSON, E. 1952. Composition of atmospheric precipitation. *Tellus* (Suecia) 4:215-230, 280-303.
12. FASSBENDER, H.W. 1972. Variaciones estacionales de elementos nutritivos en suelos derivados de cenizas volcánicas en Costa Rica. *In* IICA. II. Panel sobre suelos volcánicos de América. Pasto, Col. s.p.
13. _____. 1987. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. CATIE. Serie de Materiales de Enseñanza no. 29. 475 p.
14. _____. *et al.* 1985. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*), café con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. III. Modelos de la materia orgánica y elementos nutritivos. Turrialba (C.R.) 35:403-413.
15. FERWEDA, J.D. 1977. Oil palm. *In* Alvim, P. de T.; Kozłowski, T.T. *Ecophysiology of tropical crops*. New York, EE.UU., Academic Press. p. 351-383.
16. FÖLSTER, H.; FASSBENDER, H.W. 1984. *Okopedologische Grundlagen der Bodennutzung in den Tropen und Subtropen*. s.l., Alemania, R.F., Univ. de Gotinga, Facultad Ciencias Forestales. 199 p.
17. FORSYTHE, W. 1980. Física de suelos; manual de laboratorio. San José, C.R., IICA. 212 p.
18. FRANCO, C.M.; INFORZATO, R. 1951. Quantidade de agua transpirada pelo cafeeiro sombreado e pelo ingazeiro. *Bragantia* (Bra.) 4(6):121-125.
19. GAVANDE, S.A. 1972. Física de suelos; principios y aplicaciones. México, D.F., Méx., Limusa. 351 p.
20. GOLLEY, F.B. *et al.* 1975. Mineral cycling in a tropical moist forest ecosystems. Athenas, EE.UU., University of Georgia Press. 248 p.

21. GRIMM, U.; FASSBENDER, H.W. 1981. Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. I. Inventario de las reservas orgánicas y minerales (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Al, Na). Turrialba (C.R.) 31:27-37.
22. _____; FASSBENDER, H.W. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. III. Ciclo hidrológico y translocación de los elementos químicos con el agua. Turrialba (C.R.) 31:89-99.
23. HARDY, F. 1946. Seasonal fluctuations of soil moisture and nitrate in a humid tropical climate. Tropical Agriculture (Tri.) 23:40-49.
24. HARGREAVES, G. 1976. Tables showing climate and potential evapotranspiration for Central American and Panama. Utah State University (EE.UU.). Working Paper 76-E 166. s.p.
25. HENDRY, C.D.; BERISH, C.W.; EDGERTON, E.S. 1985. Precipitation chemistry at Turrialba, Costa Rica (Central America). s.l., EE.UU., Water Resources Research. s.p.
26. HEUVELDOP, J. et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) y de café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. II. Producción agrícola, maderable y de residuos vegetales. Turrialba (C.R.) 35:347-355.
27. HEWLETT, S.; NUTTER, W. 1969. An outline of forest hydrology. s.l., EE.UU., University of Georgia. 137 p.
28. HILLEL, D. s.f. Fundamentals of soil physics. New York, EE.UU., Academic Press. 413 p.
29. HOLDRIDGE, L.R. 1979. Ecología basada en zonas de vida. Trad. por H. Jiménez Saa. San José, C.R., IICA. 216 p.
30. HUXLEY, P.A. 1989. The tree crop interfase: a project designed to generate experimental methodology. Agroforestry Abstracts (G.B.) 2:127-145.

31. HUECK, K. 1978. Los bosques de Sudamérica. Trad. por R. Brun. Eschborn, Alemania, R.F., Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. 476 p.
32. IMBACH, A.C. et al. 1989. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with laurel (Cordia alliodora) and poró (Erythrina poeppigiana) in Costa Rica. IV. Water balances, nutrient inputs and lixiviation. Agroforestry Systems (Holanda) 8:267-287.
33. JIMENEZ, E. 1980. Efecto de las diferentes estructuras vegetales sobre el balance hídrico del cafetal. In Simposio "Estudios Ecológicos en el Agroecosistema Cafetalero" (1980, Xalapa, Méx.) Memorias. s.n.t. p. irr.
34. _____ 1989. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) y café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. VI. Balances hídricos e ingresos con lluvias y lixiviación de elementos nutritivos. Turrialba (C.R.) 39:399-414.
35. JONES, M.J.; BROMFIELD, A.R. 1970. Nitrogen rainfall at Samaru, Nigeria. Nature (G.B.) 227:86.
36. KLINE, J.R.; JORDAN, C.F. 1970. Tritium movement in soil of a tropical rain forest. In Odum, H.T.; Pigeon, R.F. (eds.). A tropical rain forest. Springfield, Va., EE.UU., Atomic Energy Commission. s.p.
37. KLINGE, H.; FITTKAU, E.J. 1972. Filterfunktionen im Ökosystem des Zentralamazonischen Regenwaldes. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen-Gesellschaft (Alemania, R.F.) 16:130-135.
38. KUNKLE, S.H.; THAMES, J.L. (eds.). 1976. Hydrological techniques for upstream conservation. FAO Conservation Guide no. 2. 134 p.
39. LANGE, O.E. et al. (eds.) 1976. Water and plant life. Berlín, Alemania, R.F., Parey Verlag. 536 p. (Ecological Studies no. 19.).
40. MALIK, R.S.; SHARMA, S.K. 1990. Moisture extraction and crop yield as a function of distance from a row of Eucalyptus tereticornis. Agroforestry Systems (Holanda) 12:187-195.

41. NYE, P.H.; GREENLAND, D.J. 1964. Changes in the soil after clearing tropical forest. *Plant and Soil (Holanda)* 21:101-110.
42. ODUM, H.T.; PIGEON, R.F. (eds). 1970. *A tropical rain forest*. Springfield, Va., EE UU, Atomic Energy Commission. 1660 p.
43. PEREIRA, H.C. 1959. Field measurements of water use for irrigation control in Kenia coffee. *Journal of Agricultural Science (G.B.)* 49:459-467.
44. _____. 1973. *Land use and water resources*. Cambridge, G.B., Cambridge University Press. 246 p.
45. RICHARDS, P.W. 1960. *The tropical rain forest*. Cambridge, G.B., s.n. 450 p.
46. ROBINSON, J.B.D. 1960. Nitrogen studies in a coffe soil. I. Seasonal trends of natural soil nitrate and ammonia in relation to crop growth. Soil moisture and rainfall. *Journal of Agricultural Science (G.B.)* 55:333-338.
47. RUTTER, A.J.; MORTON, A.J.; ROBINS, P.C. 1975. A predictive model of rainfall interception in forests. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *Journal of Applied Ecology (G.B.)* 12:367-380.
48. _____.; MORTON, A.J. 1977. A predictive model of rainfall interception in forests. III. Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables. *Journal of Applied Ecology (G.B.)* 14:567-588.
49. SALAS, G. DE LAS. 1987. *Ecosistemas forestales, con especial énfasis en América Latina*. IICA. Serie de Libros y Materiales de Enseñanza no. 80. 447 p.
50. SANTANA, M.B.M.; CABALA, R.P. 1984. Reciclagem de nutrientes en una plantacao de cacau sombreada com *Erythrina*. *In International Cocoa Research Conference (9., 1984, Togo)*. Proceedings. Lagos, Nigeria, Cocoa Producers Alliance. p. 205-210.

51. SCHROEDER, R. 1951. Resultados obtenidos de una investigación del micro-clima en un cafetal. CENICAFE (Col.) 2(18):33-43.
52. STEINHARDT, U.; FASSBENDER, H.W. 1979. Características y composición química de las lluvias de los Andes Occidentales de Venezuela. Turrialba (C.R.) 29:175-182.
53. THORNTON, I. 1965. Nutrient content of rain water in the Gambia. Nature (G B.) 205:1025.
54. VARESCHI, V. 1980. Vegetations-ökologie der tropen. Stuttgart, Alemania, R.F., Ulmer Verlag. 294 p.
55. VISSER, S.A. 1961. Chemical composition of rain water in Kampala, Uganda, and its relation to meteorological and topographical conditions. Journal of Geophysical Research (EE.UU.) 66:3754-3765.
56. WALTER, H.; LIETH, H. 1960. Klimadiagram weltatlas. Jena, Alemania, R.D., Fischer-Verlag. s.p.

CAPITULO CUARTO

CICLO DE LA MATERIA ORGANICA

4.1. La materia orgánica en el suelo

4.1.1. Aspectos generales

En el suelo, además de las partículas de origen mineral, como arena, limo y arcilla, existen otras partículas sólidas formadas a partir de la materia orgánica. La materia orgánica está constituida por los compuestos de origen biológico que se presentan en el suelo. El edafón consiste en los organismos vivos del suelo o sea su flora y fauna. En el horizonte A de suelos cultivados el edafón constituye entre el 10-15 % de la materia orgánica. El humus está compuesto por los restos postmortales vegetales y animales que se encuentran en el suelo y que están sometidos constantemente a procesos de descomposición, transformación y resíntesis. De esta manera se diferencian los conceptos materia orgánica y humus (54, 56).

En todo caso la fuente originaria de la materia y del humus son los restos de animales y especialmente vegetales que se depositan en el suelo. La vegetación consta de tallos, hojas, flores y frutos que al depositarse en la superficie del suelo constituyen la hojarasca o capa de mantillo. Cada uno de los componentes de la vegetación tienen una composición química específica. Estos residuos son objeto de su degradación o descomposición hasta los componentes elementales de las proteínas, de los carbohidratos, de las grasas y otros. La mineralización implica la formación de componentes minerales. Por medio de la mineralización se liberan una serie de compuestos importantes desde el punto de vista de la nutrición de las plantas, porque implican cantidades de N, P, S, K, Ca, Mg, etc. que se disponen directamente para las plantas. Se producen sustancias anorgánicas en forma de aniones y cationes. Las sustancias orgánicas resultantes pueden ser objeto de nuevos procesos de resíntesis y polimerización dando lugar a nuevos componentes químicos que reciben el nombre de ácidos húmicos, que tienen características y propiedades específicas. Este proceso recibe por esto el nombre de humificación (54, 56).

4.1.2. Composición de la materia orgánica

Los elementos nutritivos se acumulan en las plantas generalmente como compuestos con una estructura polimerizada como carbohidratos, proteínas, grasas o como compuestos inorgánicos de una estructura más simple. La composición bioquímica de los restos vegetales varía dentro de grandes límites según la edad y funciones del órgano vegetal analizado. Los tejidos verdes son más ricos en carbohidratos y proteínas y los tejidos leñosos presentan mayores contenidos en compuestos fenólicos (ligninas) y celulosas. También existe una gran diferencia entre los tipos de plantas analizadas y su grado de organización; las bacterias se caracterizan por su alto contenido en proteínas, los líquenes y algas presentan una gran acumulación de carbohidratos mientras que las plantas superiores muestran una distribución más equitativa de esas sustancias.

Dentro de los componentes orgánicos de los restos animales y vegetales se pueden diferenciar los siguientes grupos (54, 56):

- Carbohidratos, que constituyen los tejidos de sostén y conducción de las plantas y representan sustancias de reserva de los mismos. Entre ellos se encuentran:
 - Monosacáridos y derivados: glucosa, galactosa, ribosa, arabinosa, xilosa y aminoazúcares (glucosamina).
 - Oligosacáridos: disacáridos como sacarosa, maltosa, lactosa y trisacáridos como rafinosa.
 - Polisacáridos: almidón, hemicelulosa, pectina, inulina, glucógeno y quitina.
- Ligninas: son polímeros derivados del fenilpropano sustituido. El grado de sustitución es muy variable y la longitud de los radicales de sustitución en el fenilpropano da lugar a polímeros muy irregulares.
- Proteínas, polipéptidos y ácidos nucleicos: son polímeros constituidos con base en aminoácidos y oligopéptidos derivados. Los aminoácidos más frecuentes son la lisina, alanina y glicocola. La polimerización de aminoácidos lleva a la formación de dipéptidos; entre éstos últimos se encuentran la glutatona compuesta por moléculas de cistina, glicina y ácido glutámico. Las sustancias protéicas son cadenas de aminoácidos con una longitud y secuencia definidas, donde se

diferencian estructuras primarias, secundarias y terciarias relacionadas con la disposición de los aminoácidos.

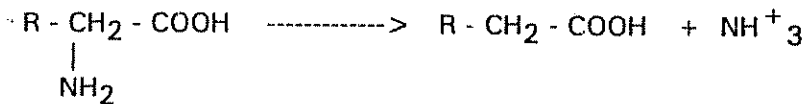
- Grasas, ceras y resinas: las grasas naturales se derivan de la glicerina esterificada con ácidos grasos, son sustancias de reserva que se acumulan en diferentes órganos de las plantas, especialmente en las semillas. Las ceras son ésteres de ácidos grasos y alcoholes que forman la cutícula del tallo, las hojas y los frutos y cumplen funciones de protección. En los fosfolípidos, una de las posiciones de polimerización de la glicerina es saturada por una molécula de ácido fosfórico. En el grupo fosfórico puede también polimerizar una base nitrogenada (por ejemplo colina o colamina) dando lugar a otras sustancias lipoides, tales como quepalina o lecitina.
- Otros compuestos: en los tejidos vegetales hay una multitud de otros componentes bioquímicos importantes como ácidos orgánicos, pigmentos, alcaloides, hormonas externas, antibióticos, quelatos, que no se consideran aquí en detalle porque desempeñan un papel de poca importancia cuantitativa en la mineralización de restos vegetales y en el proceso de humificación.

Todas estas sustancias se encuentran generalmente localizadas en las hojas de las plantas y en el momento en que se produce la caducifolia, las hojas llegan al suelo donde forman la capa de mantillo.

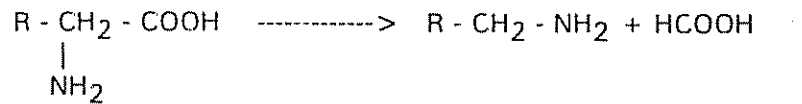
En la capa de mantillo, por medio de los procesos de la mineralización y de la humificación se producen, por un lado, sustancias minerales que son acumuladas especialmente en el horizonte A del suelo.

La mineralización y la humificación son procesos complicados. Por medio de la depolimerización de las proteínas, en función de la actividad de las bacterias, se van disgregando las diferentes unidades hasta llegar a los aminoácidos básicos.

Además los microorganismos especializados utilizan el radical amínico del aminoácido, resultando dos fracciones: un ácido húmico y el amoníaco:



Por otra parte, otros microorganismos especializados pueden atacar un enlace en una forma diferente, resultando un ácido muy corto y un amina, en la siguiente forma:



El amina es descompuesta posteriormente, dando como producto final el amoníaco y un radical carboxílico. La importancia de estos procesos es diferenciar los dos grupos de sustancias. Por un lado las que contienen N, P y S, y por otro aquellas que sólo contienen C, H y O.

El amoníaco producido en estos procesos es absorbido por las plantas, llegando al ciclo del ácido cítrico formando parte nuevamente de los aminoácidos, completando de esta forma un ácido.

El ciclo de la materia orgánica es importante, desde el punto de vista de los microorganismos, los cuales necesitan carbohidratos y complejos nitrogenados, y desde el punto de vista de las necesidades de las plantas por sus requerimientos de nitrógeno.

4.1.3. La capa de mantillo

Dentro de la capa de mantillo se diferencian tres subcapas, que reciben nombres específicos en la nomenclatura de los suelos: O_L , O_F , O_H ; L viene de "litter" o sea, hojarasca; F de fermentación o sea descomposición y H de humus, las sustancias húmicas que se van formando (54, 56).

La diferenciación óptica de estos productos en el campo es sencilla. Las hojas en el momento en que caen, tienen sus estructuras foliares normales. Generalmente antes de la caída, si existen procesos de degradación por causa de diferentes sustancias, especialmente enzimas, coenzimas y clorofila, las hojas adquieren el color amarillo rojizo. Pero si al momento de caer al suelo, quedan morfológicamente intactas entonces reciben el nombre de capa O_L .

En el proceso de transformación, los microorganismos, especialmente los insectos son los primeros en producir una descomposición físico-mecánica, comiendo y devorando las hojas. Así resulta la capa de O_F . Después de la digestión excrementan los insectos sustancias fecales donde actúan principalmente hongos y

bacterias produciendo una descomposición bioquímica, formándose las nuevas sustancias húmicas que aparecen en la capa O_H se tienen los nuevos productos de la polimerización propios del suelo, las sustancias húmicas.

Estos procesos dependen de muchos factores, por ejemplo la cantidad de hojarasca y sus características representan los factores internos. Los factores externos son las características del suelo mismo, la población de microorganismos, tanto la flora como la fauna presente, las condiciones de pH, agua disponible, elementos nutritivos, etc.; que forman la constelación de las necesidades de los microorganismos para desarrollarse y poder producir los procesos de mineralización y humificación.

En función de las características de la capa de mantillo y las subcapas O_L , O_F y O_H , se han diferenciado tres términos para caracterizar los tipos de mantillo: "mull", "moder" y "humus bruto" (terminología adaptada del idioma alemán por las ciencias del suelo, y aceptada también en español) (54, 56).

El "mull" está caracterizado por una gran velocidad en el proceso de transformación de los restos vegetales. En el término de un año desaparecen las hojas como tales, formando parte de la capa del suelo mineral, rica en sustancias húmicas.

En el caso del "mull", los procesos son rápidos, en función de las temperaturas altas, de las condiciones óptimas de precipitación, del pH y de los componentes del suelo, registrándose una actividad acelerada de los microorganismos.

En el caso del "humus bruto", la velocidad de descomposición de la materia orgánica disminuye notablemente, pudiendo durar entre 10 y 20 años. El "moder" es una situación intermedia.

En condiciones tropicales y subtropicales, prácticamente solo se tiene el "mull". La formación de "humus bruto" puede ocurrir en condiciones de humedad excesiva, casos extremos se presentan en las ciénagas, donde se pueden encontrar grandes capas de residuos vegetales que no son transformados.

4.1.4. El humus en el suelo mineral

El contenido porcentual de materia orgánica en los primeros centímetros del suelo es alto y va decreciendo en profundidad, lo cual

puede definirse como una disminución regular del contenido de carbono orgánico. En el caso de que aumentara, se trata de una disminución irregular y tiene bastante importancia en la taxonomía de suelos, ya que se debe a la presencia en el suelo de horizontes enterrados y cubiertos por capas aluviales o de otro tipo (54, 56).

Algunos trabajos que caracterizaron el contenido de materia orgánica en suelos tropicales, como los de Díaz-Romeu *et al.*, 35; mostraron que los valores del horizonte A varían en un promedio del 2 % al 5 %, siendo los valores máximos del 6 % en suelos asociados a cenizas volcánicas (35, ver Cuadro 4.1).

Esta característica del contenido de materia orgánica del suelo, se ha utilizado para agrupar suelos y se han obtenido clasificaciones como la de Hardy (ver en Fassbender y Bornemisza, 54).

<u>Interpretación</u>	<u>Materia orgánica C%</u>	
Bajos en materia orgánica	< 2,0	< 1,15
Medios en materia orgánica	2,1 - 4,9	1,2 - 2,3
Altos en materia orgánica	4, 1-10,0	2,4-5,8
Muy altos en materia orgánica	> 10,0	> 5,8

En el horizonte B, salvo excepciones como la de los suelos derivados de cenizas volcánicas, la disminución de materia orgánica es notoria y se debe a que la acumulación de restos orgánicos y la actividad se cumple en los primeros decímetros del suelo quedando cantidades menores en el horizonte B.

El ámbito de variación del contenido de materia orgánica en el suelo, está sujeto a diversos factores como el clima (temperatura y precipitación en especial); acidez del suelo (pH); tipos de vegetación que cubren el suelo; población de micro y macroorganismos; régimen de humedad del suelo; drenaje; microrelieve y el tipo de uso que se dé al suelo.

Jenny (92, ver en Fassbender y Bornemisza 54), indicó que los contenidos de materia orgánica y de N en los suelos, están determinados, en primer lugar, por el clima y la vegetación y en segundo lugar, por factores locales como el relieve, material parental del suelo, tipo y duración de la explotación de los suelos y por otras características físicas y microbiológicas.

Cuadro 4.1. Contenido de C y N en algunos suelos de América Latina. (Fassbender y Bornemisza, 54).

Autor(es)	Región	Tipo de suelo (grupo)	Nº de muestras	pH	Horizonte A		pH	Horizonte B	
					%C	%N		%C	%N
América del Sur									
Viena-Bornemisza	Amazonas	Latosol	7	4,80	3,10	0,20	5,30	0,47	0,02
		No latosol	5	5,30	2,47	0,23	5,62	0,47	0,03
Sombroek	Amazonas		18	4,55	2,53	0,22	4,42	0,32	0,04
Klinge	Amazonas		19	3,90	2,41	0,11	3,70	0,65	0,06
Roeder-Bornemisza	Amazonas		8	5,30	0,55	0,06	--	--	--
Cabala-Fassbender	Bahía		8	6,00	1,42	0,17	5,40	0,57	0,03
Blasco <i>et al</i>	Amazonas (Colombia)	Cultivo	46	5,40	4,2	0,67	5,50	2,70	0,36
		Pradera	-	5,60	2,9	0,53	5,90	1,70	0,23
		Pantano	-	5,50	6,8	0,92	5,3	7,90	0,95
Blasco	Nariño (Colombia)	Andosol	6	5,31	6,30	0,50	--	--	--
		Subalpino							
		Montano	6	6,01	3,19	0,33	--	--	--
		Subtrópico	3	5,18	2,57	0,27	--	--	--
FAO	Llanos (Colombia)	Trópico	6	5,60	6,31	0,70	--	--	
			-	4,70	1,36	0,16	--	--	
FAO	Sudamérica	Acrisoles	10	4,85	2,21	0,18	4,86	0,56	0,063
		Ferrasoles	10	4,66	2,75	0,22	5,10	1,00	0,078
		Cambisoles	6	5,06	3,70	0,37	5,10	1,10	0,11
América Central									
Díaz-Romeu, Balardi y Fassbender		Andosoles	56	5,58	3,06	0,39	5,12	0,70	0,037
		Litosoles	21	5,59	2,20	0,43	5,67	0,71	0,030
		Fluvisoles	20	6,02	3,09	0,30	5,89	1,37	0,098
		Cambisoles	32	4,91	3,66	0,68	4,93	0,90	0,053
		Pluvisoles	12	5,79	2,41	0,54	5,28	0,50	0,167
		Brunizemes	12	5,95	2,38	0,41	5,00	0,55	0,036
		Luvisoles	8	5,10	3,05	1,32	5,33	1,02	0,073
		Regosoles	3	5,06	3,26	0,20	4,73	1,03	0,073
		Rhodosoles	2	5,55	2,40	0,23	5,65	0,85	0,055
		Vertisoles	2	5,95	1,75	0,18	5,30	1,70	0,080

Así cada factor actúa de la siguiente manera:

- Lluvia: al aumentar el agua de lluvia (ver Capítulo 2) aumenta la biomasa de los bosques y así su producción de hojarasca. Sin embargo ésta puede provocar una disminución de la materia orgánica, debido probablemente, al movimiento de la misma por erosión.
- Altura: se ha encontrado una dependencia de la materia orgánica con respecto a la altura, en el sentido de que: 1) a

mayor altura, mayor es el porcentaje de materia orgánica, 2) la producción de hojarasca y la población microbiana, están en función de la disminución de temperatura, que se calcula en 6 °C por cada 100 metros.

En un trabajo de Jagnow, (ver Fassbender y Bornemisza, 54) en el cual se relacionan altura y precipitación pluvial con el contenido de materia orgánica en suelos de Africa Oriental, se establece una función matemática múltiple que permite calcular el contenido de carbono para un lugar, al conocer su altura y la precipitación.

Jenny, (92), citado por Fassbender y Bornemisza, (54) propuso el uso de temperaturas medias para calcular el contenido de C y N en los suelos, con el objeto de conocer sus variaciones, es decir, de conocer los cambios de temperatura necesarios para duplicar o reducir a la mitad el contenido de C y N. En general puede decirse que los suelos tropicales son susceptibles a los cambios de temperatura y por ejemplo, para condiciones de Colombia, se encontró que al aumentar la temperatura media anual en 5,0 °C, el C se redujo a la mitad.

- Materia parental: ésta tiene un efecto indirecto sobre la materia orgánica de los suelos, ya que rocas ricas en nutrimentos como las cenizas volcánicas, permiten el desarrollo de vegetación exuberante que al final producirá mayor cantidad de restos vegetales y por ende materia orgánica. De alguna manera, algunos factores ecológicos pueden determinar el contenido de materia orgánica en un suelo, como ejemplo en Costa Rica, por efectos de los vientos, las cenizas volcánicas de la Cordillera Central son arrastradas hacia la vertiente Pacífica, desarrollándose así suelos más influenciados por ellas.
- Arcillas: el contenido, tipo y reacción de las arcillas actúa como agente estabilizante de la materia orgánica y se forman complejos estables entre los minerales arcillosos y las sustancias húmicas del suelo. Por ejemplo, la alófana, que es un mineral amorfo, presente frecuentemente en los suelos derivados de cenizas volcánicas, tiene un mayor número de radicales funcionales que llevan a una absorción y estabilización de las sustancias húmicas.
- Reacción del suelo: ésta influye sobre el contenido de materia orgánica en el suelo en formas diversas; así, el pH actúa en el contenido y composición de los microorganismos, en condiciones de acidez, la acción bacteriana se limita,

resultando menor la eficiencia en los procesos de mineralización y humificación. También el pH determina la saturación del complejo de intercambio de los suelos.

- Condiciones del agua: cuando se presentan condiciones anaeróbicas, por ejemplo en inundaciones, el proceso se modifica dando lugar a turbas o ciénagas.

4.1.5. Análisis de la materia orgánica del suelo

El contenido de humus en el suelo se caracteriza en función de su análisis. El análisis implica la determinación del contenido de carbono. En función de que el carbono participa, en promedio, con el 48 % de la materia orgánica, se tiene un factor de corrección para el cálculo del contenido de materia orgánica en el suelo, analizado por van Barmelen (Fassbender y Bornemisza, 54).

$$\begin{array}{ccc}
 & 1,72 & \\
 C & \xrightarrow{\hspace{1.5cm}} & \text{Materia orgánica} \\
 & \xleftarrow{\hspace{1.5cm}} & \\
 \% & 0,48 & \%
 \end{array}$$

La materia orgánica además está constituida por carbono (48 %), oxígeno (40 %) e hidrógeno (6-8 %); la participación de N, P, S y otros elementos menores es más pequeña. Los elementos C, H y O implican prácticamente el 98 % de la materia orgánica.

Entre los diferentes métodos de análisis se mencionan: el método de la digestión húmeda, a base de dicromato de potasio, y el método de la digestión seca, donde el suelo se somete a temperaturas de 1000 °C. La materia orgánica se destruye, volatilizándose el CO₂ que es medido volumétricamente.

Para la caracterización del contenido de materia orgánica en el suelo, se usan además criterios basados en las relaciones C/N y C/P orgánico y C/S orgánico.

Los valores de la relación C/N en suelos agrícolas varía normalmente, entre nueve y 14, siendo más bajos en suelos de regiones áridas que en suelos de regiones húmedas, en condiciones de temperatura similar. En condiciones de igual precipitación, los valores son más altos en regiones frías que en regiones cálidas y también, la relación C/N es más baja en suelos neutros o ligeramente alcalinos.

La relación C/P y C/S orgánicos tienen valores que oscilan alrededor de 100. En el caso de la relación C/P orgánico, los valores dependen mucho del método de determinación utilizado para el cálculo del P orgánico; por último, una relación de C/P orgánico de 300 es considerada desfavorable, lo mismo en el caso de que la relación C/S sea de 400-500.

4.1.6. Importancia del humus en el suelo

El humus es importante en el suelo, ya que interviene en diversos procesos y determina una serie de características, a saber:

- Color: el contenido de materia orgánica determina en gran medida el color del suelo; a mayor cantidad, el color se vuelve más oscuro y en función de esto, puede hacerse una determinación aproximada de la materia orgánica y clasificarla en baja, media, alta y muy alta.

Se tienen por ejemplo:

1. Suelos negros: 10-15 % de materia orgánica
2. Suelos pardo-negros: 5-10% de materia orgánica
3. Suelos pardos: 2-5 % de materia orgánica
4. Suelos amarillos: 0-2 % de materia orgánica
5. Suelos pálidos: arenas sin materia orgánica (aunque podría darse el caso de arenas teñidas con algunos óxidos como los de titanio)

El color tiene importancia para el balance térmico del suelo, ya que favorece o dificulta la absorción de la energía solar. En suelos oscuros hay mayor absorción de ondas infrarrojas y por lo tanto mayores temperaturas, que al final son favorables. Por el contrario colores claros reflejan la mayoría de los rayos solares y tienen un albedo alto (50%) y son suelos más fríos. Las temperaturas son importantes para los microorganismos, los cuales participan en los procesos de transformación de la materia orgánica.

- Agregados; en general, la materia orgánica favorece la formación de agregados. Las partículas de arena, limo y arcilla se agregan por medio de sustancias de coagulantes y así en última instancia resultan los compuestos orgánicos minerales de gran importancia en el suelo.
- Plasticidad y disponibilidad del agua; las cuales mejoran con el aumento de la materia orgánica y así reduce la cohesión, que al final influye en el régimen hídrico del suelo. Favorece la formación de micro y macroporos en suelos arcillosos, incrementando la velocidad de infiltración, permeabilidad y aireación. En suelos arenosos, favorece el crecimiento de humedad por sus características higroscópicas.
- Capacidad de intercambio catiónico (CIC), aumenta la capacidad de intercambio catiónico, los valores de CIC son más altos en la materia orgánica que en coloides arcillosos. Dependiendo del pH, se estima un CIC de 200 meq/100 g de materia orgánica con $\text{pH} = 7$ y de 85 meq/100 g de materia orgánica para un $\text{pH} = 4,5$. La CIC también es afectada por el estado de descomposición de los residuos orgánicos.

En síntesis la materia orgánica tiene una CIC alta que le permite fijar y retener cationes, evitando su pérdida por lixiviación, y también es capaz de retener aniones, en especial fosfatos y sulfatos, evitando su pérdida por lavado o precipitación como sales insolubles.

- Acidez; la materia orgánica aumenta la capacidad tampón de los suelos, evitando cambios bruscos del pH, generados por ejemplo por la dilución de sales fertilizantes, es decir regula la acidez.
- Elementos nutritivos; favorece la disponibilidad del N, P y S por medio de los procesos de mineralización.
- Procesos pedogenéticos; la materia orgánica participa en ellos debido a sus propiedades de peptización, coagulación, formación de quelatos y otros.
- Formación de sustancia inhibidoras; debido a la presencia de diversas sustancias como lignina y otras en los restos de vegetales, éstas pueden inhibir el desarrollo de los microorganismos afectando los procesos de humificación.

- Labranza; el contenido de materia orgánica por sus efectos en la agregación de partículas estructurales, puede favorecer el manejo de los suelos en relación a su laboreo.

4.2. Ciclo de la materia orgánica en ecosistemas forestales

4.2.1. Contenido de materia orgánica en ecosistemas tropicales

Las formaciones ecológicas clímax de áreas tropicales se encuentran en general en un estado estático. La producción de nueva fitomasa es comparable a la deposición y descomposición de restos vegetales (anabolismo = catabolismo). Bajo estas condiciones se tiene en esos ecosistemas un ciclo cerrado, interno de elementos nutritivos, en el cual la biomasa y las velocidades de transformación y transferencia de los elementos nutritivos dependen en gran parte de las condiciones edafológicas y climatológicas (54, 56).

Al tratar de hacer un estudio del ecosistema, es necesario por un lado hacer un inventario de las diferentes unidades por estudiar dentro del ecosistema, como materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, etc., subdividiendo entonces el ecosistema en los diferentes compartimentos: la vegetación (compartimentos tallos, hojas, ramas, raíces, sotobosque, etc.), la capa de mantillo y el suelo mineral. Este inventario tiene que realizarse en función de la determinación de la materia orgánica, en los diferentes órganos del bosque o del rodal.

Los flujos de materia orgánica que existen dentro del ecosistema pueden ser vía hojarasca por medio de la producción de residuos vegetales, que se incorporan al suelo cayendo primero sobre la capa de mantillo donde van siendo descompuestos e incorporados al suelo en función de los procesos de mineralización y humificación.

El crecimiento o incremento de la biomasa de tallos o ramas puede medirse con equipos específicos. La producción de hojarasca que pasa a la capa de mantillo es una medición indirecta de la producción foliar. También es necesario considerar la producción de frutos.

Los procesos de transferencia de elementos nutritivos dentro de los compartimentos se llevan a cabo con medios de transporte como el agua (lluvia, lavado foliar, escurrimiento de tallos, escurrimiento superficial, filtración a través del suelo y filtración en el agua freática), y la materia orgánica (producción de restos vegetales, descomposición y

liberación de elementos nutritivos). Con el agua se produce un flujo de elementos disueltos en el ecosistema, siendo estos solubles en agua, como los nitratos y amonios (N), sulfatos (S), fosfatos (P), potasio, calcio y magnesio. Con base en estos procesos se calculan también las ganancias y pérdidas de elementos nutritivos de los sistemas (54, 56).

En las últimas décadas existe un interés creciente en el estudio de los ciclos de la materia orgánica y elementos nutritivos de ecosistemas naturales tropicales. Sin embargo, el número de estudios completos, hasta ahora, es muy limitado. Las revisiones recientes de la literatura se refieren a la descripción total de los ciclos (21, 49, 54, 56, 60, 63, 71, 72, 94, 100, 123, 166), o a evaluaciones parciales de la biomasa de los ecosistemas (20, 52, 54, 56, 71, 72, 100, 138, 141), la producción y descomposición de residuos vegetales (18, 53, 54, 71, 72, 136, 137).

- Materia orgánica en ecosistemas montanos

Para la evaluación de la información sobre las reservas orgánicas de ecosistemas se han propuesto criterios de fertilidad del suelo (baja, media, alta (97, 144), la cual puede determinar la fisonomía de los mismos y de su diferenciación ecológica en formaciones vegetales (50, 51, 74, 75, 144, 157, 158). Una separación de ambos enfoques es a veces contradictorio, pues ambos tienen carácter complementario. La información conocida se presentará a continuación diferenciando:

- Ecosistemas montanos (altura > 500 msnm) lluviosos o nublados
- Ecosistemas de llanura (altura < 500 msnm) siempreverdes, deciduos y de sabanas.

Los resultados obtenidos en bosques montanos se basan en comparaciones de ecosistemas de Nueva Guinea (38, 39), Nepal (166), Puerto Rico (130), Jamaica (157, 158, 159) y Venezuela (50, 51, 74, 75). En estos últimos se trata como un ejemplo el ciclo de la materia orgánica en forma integral.

El estudio se realizó en el bosque "San Eusebio" (La Carbonera) de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de los Andes, localizada en las laderas nor-occidentales de la Sierra de Mérida, Venezuela (8° 37' norte, 71° 21' este, a una altura entre 2000 y 2500 msnm). Los detalles sobre la localización y las condiciones pluviométricas han sido publicados anteriormente (Capítulo 3.3.2) (ver 50, 51, 74, 75). La temperatura promedio anual alcanza 12,6 °C y la

variación promedio de la temperatura media es de 9,2 °C. Con un total aproximado de 1500 mm de lluvia al año se registra un carácter climático húmedo y hasta perhúmedo.

Los rodales de la reserva forestal pueden considerarse de carácter natural primario, aunque algunas veces se ha observado la explotación selectiva de algunos árboles. El paisaje es bastante heterogéneo, encontrándose por un lado rodales altos con un número pequeño de árboles gruesos en las laderas, y por otra parte, rodales de árboles de altura irregular y una composición mixta con un número mayor de árboles en las crestas y depresiones.

Entre las especies forestales más importantes cabe mencionar al pino liso (*Podocarpus rospigliosii*), pino aparrado (*Podocarpus oleifolius*), mortiño rosado (*Graffenrieda latifolia*), saysay (*Myrcia fallax*), tetajira (*Eschweilera monosperma*) y laurel curó (*Beilschmiedia sulcata*). En los casos circunstanciales de doseles abiertos, se observa una gran cantidad de plantas epífitas (especialmente de las familias bromeliáceas, aráceas, araliáceas y orquídeas) y las raíces de plantas hemiepífitas (especialmente tampoco, *Clusia multiflora*).

Los bosques en estudio fueron reconocidos por recorridos terrestres y se escogieron 13 parcelas en las cuales se realizó un inventario para determinar la fitomasa correspondiente, en función de la distribución de las especies por altura y diámetros. Los lotes de muestreo cubrieron una área de 50 x 50 m donde se midieron todos los árboles vivos y muertos con un diámetro mayor de 10 cm; los árboles de menor diámetro fueron registrados en un radio de 15 m (0,07 ha) a partir del centro de la parcela. El sotobosque se muestreó en subparcelas de 2 x 2 m (4 m²) con 12 repeticiones distribuidas radialmente a partir del centro de la parcela, separando árboles de una altura menor de 130 cm y plantas edáficas. En estas subparcelas se tomaron muestras de raíces finas (< 5 cm de diámetro) con anillos metálicos de 20 cm de diámetro.

En una parcela de tala rasa se escogieron 86 árboles representativos de las 33 especies forestales más importantes; en función de su diámetro y altura se calculó el volumen del tallo y con el peso específico de la madera, el peso seco correspondiente. Las ramas, hojas y epífitas fueron pesadas por separado y se colectaron alcuotas correspondientes en bolsas plásticas para su secado en una estufa a 105°C por 24 horas. Igualmente se excavaron las raíces gruesas (> 5 cm diámetro) de 30 árboles, determinándose su volumen y peso. En cada una de todas las muestras se determinó el peso seco, el cual fue utilizado para cálculos posteriores.

En cada una de las trece parcelas en estudio se tomaron muestras del mantillo (0,25 m², capas de hojarasca y húmica) y del suelo (barrenamiento 0 - 20, 20 - 40, 40 - 60, 60 - 90 y 90 - 120 cm de profundidad) con doce repeticiones respectivamente, las cuales fueron homogeneizadas en muestras representativas.

En función de los barrenamientos arriba indicados se grabó en cada una de las parcelas una calicata para la descripción del suelo y tomar muestras volumétricas del suelo (anillos metálicos de 250 cm³, cuatro repeticiones por profundidad) con las cuales se determinó el peso específico de los suelos.

Para los análisis químicos se prepararon muestras en vegetación (tallos, ramas, hojas, raíces, sotobosque y epífitas), de mantillo y de suelos, analizándose características físicas (granulometría, curva de succión) y químicas (pH, C, N, P, K, Ca, Mg, Al) con métodos apropiados (50, 51).

Aunque los resultados del análisis de suelo se han considerado en detalle en otras publicaciones (50, 51, 74, 75) aquí es necesario describir algunos detalles. Los valores de pH son bastante homogéneos en todo el perfil del suelo (promedio 3,5 a 3,9) y entre las parcelas (coeficiente de variación 2 a 5 %) y se les deben considerar como extremadamente ácidos. Los valores de la materia orgánica son bastante altos: en el suelo alcanzan valores promedio de 5,5 % (0 - 20 cm) y la disminución en el subsuelo es notoria, aunque aún en una profundidad de 90 cm se encuentra todavía un valor de 1 % C. De la relación C/N promedio entre 12 y 9,5, resulta un valor promedio alto de N. El P es relativamente bajo, el P orgánico contribuye con el 50 % de P_t (0 - 20 cm).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es relativamente baja, oscilando en el perfil entre 12 y 18 meq/100 g de suelo, ello es explicable ya que la caolinita es el mineral arcilloso predominante; el aumento de los valores de CIC en la capa 90 a 120 cm se debe al aumento de la fracción de arcillas. De acuerdo con el pH del suelo el Al es el catión intercambiable predominante.

Los valores de las reservas orgánicas en la fitomasa y en el suelo, en promedio de las 13 parcelas estudiadas y para cada uno de sus compartimentos, se presentan en el Cuadro 4.2. Por otro lado se presentan en forma comparativa y gráficamente los valores correspondientes de la literatura (Figura 4.1).

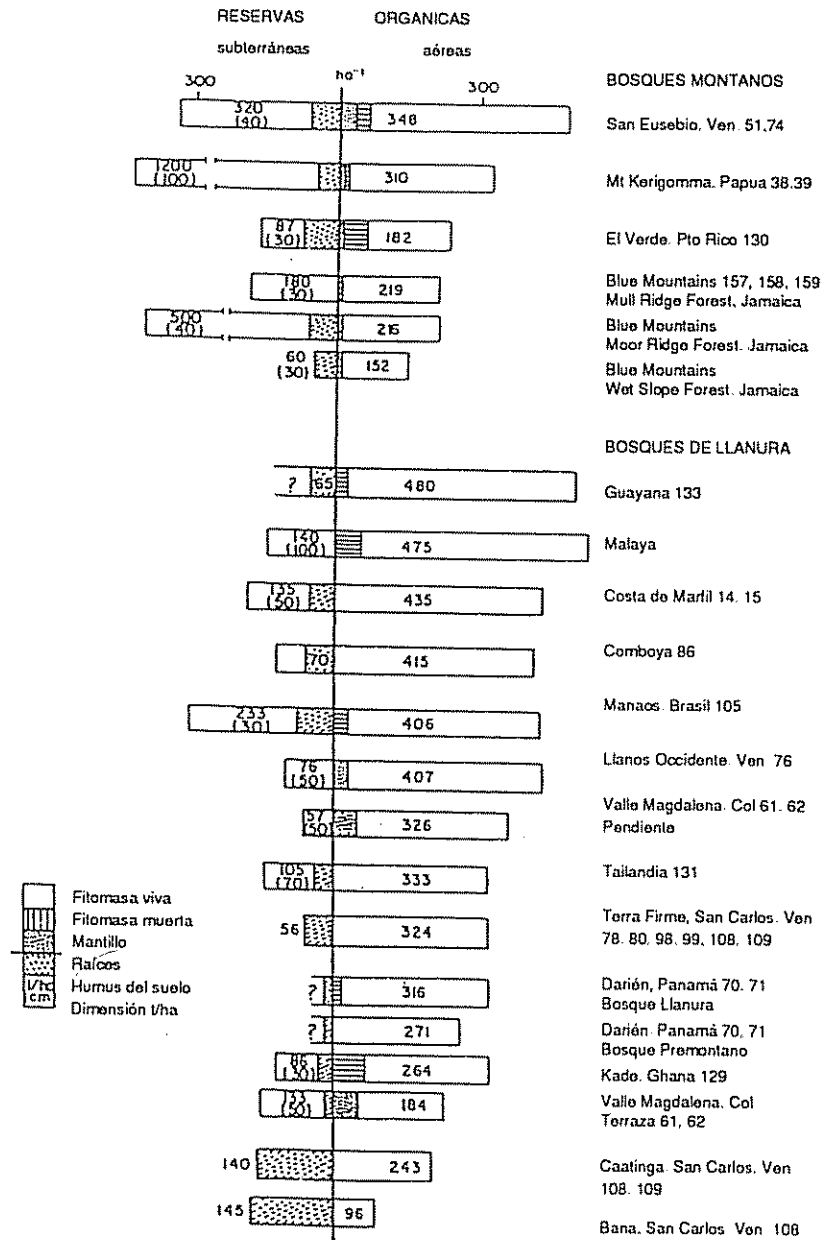


Figura 4.1. Reservas orgánicas de diferentes ecosistemas forestales tropicales (t·ha⁻¹; según diferentes autores).

El ecosistema forestal montano andino en estudio presenta, en comparación con otros valores disponibles, una fitomasa aérea viva bastante alta, con un promedio de 348 t.ha^{-1} ; la madera muerta llega a 24 t.ha^{-1} y las raíces a 57 t.ha^{-1} . La materia orgánica en la capa de mantillo en San Eusebio alcanza 38 t.ha^{-1} y en el suelo mineral, hasta 120 cm de profundidad, se encuentran 583 t.ha^{-1} . En el ecosistema se alcanza así un total de 1049 t.ha^{-1} de materia orgánica.

La relación de las reservas orgánicas en la vegetación aérea a las raíces es de 7 a 1. La mayor reserva orgánica del bosque se encuentra en los tallos, la cual no participa en los procesos de transferencia en el ecosistema.

Cuadro 4.2. Reservas orgánicas (t.ha^{-1}) y minerales (kg.ha^{-1}) en el ecosistema forestal de San Eusebio, Venezuela (promedio de 13 parcelas) (según Grimm y Fassbender, 74).

	Materia orgánica	N	P	K
VEGETACION	404,0	1 107	66,4	1 469
Tallos	269,7	543,0	32,4	846
Ramas	43,3	155,0	7,53	206
Hojas	4,6	75,3	4,96	63,2
Raíces < 5 cm	24,6	157,0	9,44	58,1
Raíces > 5 cm	31,8	74,2	4,59	89,5
Arboles < 10 cm	24,5	65,8	4,44	130
Arboles, altura > 1,3 m	0,86	9,65	0,729	15,1
Flora edáfica	0,06	0,94	0,076	1,30
Bromeláceas	2,60	14,3	1,47	36,40
Orquídeas	0,24	1,56	0,137	2,60
Bambúes	0,63	2,82	0,232	6,78
Lianas	1,10	6,58	0,468	13,1
MADERA MUERTA	23,6	58,0	3,51	28,3
MANTILLO	38,0	583	29,2	59,4
Reciente	5,9	64,4	3,96	12,3
Descompuesto	32,1	519	25,2	47
SUELO MINERAL	583,5	27 197	6 424	934
0 - 20 cm	182,1	4 603	1 774	211
20 - 40 cm	137,2	5 381	1 608	201

Continuación Cuadro 4.2.....

40 - 60 cm	92,6	4 321	1 007	139
60 - 90 cm	100	5 508	1 089	190
90 - 120 cm	71,5	7 384	945	243
TOTAL ECOSISTEMA	1 049	29 994	6 523	2 490

Las fracciones dinámicas de la biomasa, que producen restos vegetales dentro del sistema, alcanzan 4,6, 2,8 y 12,7 t.ha⁻¹ en forma de hojas, epfitas y raíces finas respectivamente. La madera muerta en el bosque es un aspecto particular de las condiciones estudiadas, donde alcanza 2 % de la reserva orgánica total. La interpretación de las reservas orgánicas en el suelo presentada anteriormente explica la razón por la cual en el suelo se encuentran 55 % de las reservas, dándole así una estabilidad grande al ecosistema como tal.

Cuadro 4.3. Concentraciones de elementos químicos en algunos compartimentos (g.kg-1 materia seca) (según Grimm y Fassbender, 74).

	Hojas (n = 55)	Ramas (n = 90)	Tallos (n = 86)
N	16,4	3,6	2,0
P	1,112	0,147	0,120
K	12,5	4,80	3,10
Ca	4,57	3,31	1,87
Mg	2,44	0,78	0,54
Fe	0,138	0,087	0,060
Mn	0,423	0,127	0,090
Al	1,64	0,27	0,18
Na	0,052	0,043	0,029

Los valores promedio de las concentraciones encontradas para algunos elementos químicos y compartimentos de la vegetación analizados se han agrupado en el Cuadro 4.3. Una interpretación de los contenidos de las diferentes especies forestales indica que las especies cedrillo (*Guarea khuntiana*), pino laso (*Podocarpus rospigliosii*) y pino aparrado (*Podocarpus oleifolius*) presentan generalmente valores más elevados, en cambio, el copey (*Ternstroemia acrodantha*) presenta los más bajos. El mortiño rosado (*Graffenrieda latifolia*) presenta valores de

Al extremadamente altos en las hojas ($15,5 \text{ mg.kg}^{-1}$), indicando una adaptación a las características de los suelos. De manera general se observa la disminución gradual del contenido de reservas inorgánicas de las hojas a ramas, tallos y raíces. En los compartimentos del sotobosque (regeneración, plantas del suelo) y en las epífitas (líanas, bromeliáceas y orquídeas) se encuentran valores comparables a los de las hojas.

Los valores de las reservas inorgánicas presentes en el ecosistema distribuidas en la vegetación, el mantillo y en el suelo, se encuentran en el Cuadro 4.2 como promedio de las 13 parcelas estudiadas.

La distribución de las reservas minerales en los diferentes compartimentos de la vegetación indica que la mayor parte de las reservas se encuentra inmovilizada en los tallos, alcanzando valores de 70 a 80 %. Los valores correspondientes para las hojas alcanzan para algunos elementos un 7 % del total (N y P).

Las reservas correspondientes encontradas en la capa de mantillo representan las reservas totales en el ecosistema; los valores de N y P en el suelo corresponden a las reservas totales, los correspondientes de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Na y Al representan solamente la fracción intercambiable.

En un intento de clasificación de las 13 parcelas estudiadas, se establecieron los siguientes cuatro grupos de sitio forestal en función de la vegetación, del relieve, de la inclinación y del hidromorfismo en el suelo (Cuadro 4.4; ver también 74):

Tipo A: rodales con doseles cerrados en laderas de pendiente media a pronunciada, con suelos del tipo oxico humitropept, sin carácter hidromórfico, con árboles de media altura (22 m) y diámetro de 23 cm; a este grupo pertenecen las parcelas 1, 2 y 11.

Tipo B: rodales en pendientes medias con suelos del tipo aquico humitropept, con hidromorfismo en el subsuelo, con árboles de gran altura, especialmente el pino laso (*Podocarpus rospigliosii*) de hasta 35 m; aquí pertenecen las parcelas 6, 7, 8, 9, 10.

Tipo C: rodales en pendientes ligeras con suelos del tipo aquico humitropept, con hidromorfismo más marcado, con una reducción marcada de la altura media

de los árboles (< 20 m) y su diámetro; aquí se consideran las parcelas 3 y 13.

Tipo D: rodales en superficies casi llanas con suelos de hidromorfismo marcado (horizonte bg), del tipo typic tropaquec, con árboles de doseles abiertos, de escasa altura (promedio 14 m) y diámetro (promedio de 18 cm); parcela 12.

En el Cuadro 4.4 se presentan las reservas orgánicas y minerales de los diferentes lugares de sitio establecidos. La materia orgánica alcanza su valor máximo en todos los compartimentos de la vegetación y del suelo en los rodales B en función de la presencia de árboles dominantes de muy buen desarrollo. Las condiciones de hidromorfismo aumentan hacia los rodales del tipo C y D, determinando una disminución gradual de las reservas orgánicas. Las reservas inorgánicas del suelo, especialmente las de N, P y K correlacionan con los valores de la vegetación. Las reservas inorgánicas de los suelos y las capas de mantillo presentan las mismas tendencias; el N aumenta de 6,055 kg.ha⁻¹ (tipo A) a 8.900 kg.ha⁻¹ en el tipo B y disminuye a 5,500 kg.ha⁻¹ en el tipo D. De ello se concluye que en el ecosistema montano forestal andino de San Eusebio existe una adaptación marcada entre el régimen hídrico del suelo, sus reservas minerales y orgánicas y la vegetación correspondiente.

Cuadro 4.4. Reservas orgánicas (t.ha⁻¹) y minerales (kg.ha⁻¹) en los cuatro sitios forestales (según Grimm y Fassbender, 74).

		A	B	C	D
Fitomasa		330	411	262	206
Madera muerta		25,6	25,0	20,6	13,6
Mantillo		32,8	24,3	79,1	21,0
Raíces		67,8	57,3	57,3	58,4
Mat. org. suelo		552	580	586	828
Vegetación	N	1157	1228	949	873
	P	69	73	57	52
	K	1462	1672	1200	1019
Suelo +	N	6055	8892	7866	5489
Mantillo	P	535	1325	698	482
	K	251	325	106	50
Tipo de suelo		Oxic humi- tropept	Aquic humi- tropept	Aquic humi- tropept	Typic trop- aquept

En el Cuadro 4.5 se presentan los datos encontrados en la literatura sobre las reservas orgánicas de ecosistemas montañosos. Aunque los valores han sido ordenados según la altura sobre el nivel del mar no se reconoce una adaptación de las reservas a la temperatura. Aparentemente las condiciones hidrológicas y edafológicas son también decisivas para el establecimiento y desarrollo de los ecosistemas.

Los valores encontrados por Yoda (1966) en diferentes ecosistemas de Nepal basados en vegetación de Quercus semicarpifolia, Tsuga dumosa, Abies spectabilis, Juniperus wallichiana dejan reconocer un valor máximo de biomasa a 2750 m el cual disminuye gradualmente con la altura. Sin embargo, el valor máximo de biomasa foliar lo logran los abetos a alturas de en promedio 3000 m.

Materia orgánica en ecosistemas de llanura

La cantidad de trabajos sobre la fitomasa en ecosistemas forestales naturales de zonas bajas tropicales y subtropicales analizados es mayor que la de los montañosos. Su número es sin embargo, limitado, alcanzando solamente de 20 a 30 lugares. Esta indicación no es satisfactoria y se debe a que no siempre existen determinaciones totales de la biomasa acumulada en el ecosistema como tal (incluyendo el suelo); más aún, en algunos casos sólo se trata de inventarios de madera utilizable y así se tiene una información indirecta de la biomasa. Así, Brown y Lugo (1970) encontraron al evaluar datos de 21 ecosistemas, que la madera de los tallos contribuye con un 63 % de la biomasa total vegetal de los ecosistemas. Klinge (1966), por otro lado, ha analizado la relación que existe entre el área basal de los árboles y la biomasa vegetal total de los ecosistemas, indicando que existe una buena correlación entre ambas variables. Más aún él indica que el volumen total de la madera utilizable es una medida adecuada; por otro lado indica que es conveniente diferenciar entre los ecosistemas de poca influencia de aguas freáticas (tierra firme) y los inundables o también de condiciones nutrimentales favorables.

Cuadro 4.5. Reservas de materia orgánica de ecosistemas forestales tropicales montanos (t.ha⁻¹; diferentes autores).

Lugar, País, Autor	Altura (m)	T° (°C)	Lluvia (mm)	Tallos	Ramas Raíces	Hojas	Muerto	SUB-TOTAL VEGT.	Man-tillo	Suelo (cm)	TOTAL
El Verde, Pto.Rico Odum (130)	500	22	3760	255	71	8,1	---	334	60	81 (30)	450
Blue Forest, Jamaica Tanner Mull (157, 158, 159) Moder	1500	13	4000	209	54	7,5	---	269	---	500 (45)	769
San Eusebio, Venezuela Grimm, Fassbender (50, 51, 74, 75)	2300 2500	12	1600	337	56	8,1	---	334	---	---	---
Kerigoma, Papua Edwards, Grubb (38, 39)	2400 2600	8-18	4000	301	40	9,1	---	350	---	340 (25)	690
Nepal/Quercus Yoda (166)	2270	2390				7,5		562			
Isuga	2720	2760				9,3		661			
Abies	2920	3280				20,3		475			
Abies	3420	3680				13,3		321			
Juniperus	3830	3870				7,9		75			

En el Cuadro 4.6 se presentan los resultados de biomasa y de humus acumulados en diferentes ecosistemas seleccionados de la literatura. La interpretación de las reservas de materia orgánica en el suelo presenta algunos problemas; los datos obtenidos se refieren a diferentes profundidades y a veces faltan los datos. La interpretación de los datos de biomasa también presenta limitaciones debido a las diferencias entre los métodos utilizados. Por tanto, muchas veces se utiliza el método de árboles representativos que son cosechados y medidos o el método de cosecha total de los árboles de la parcela; las determinaciones en el sotobosque también son muy diferenciadas. La información sobre madera muerta no siempre es homogénea, y es muy escasa la determinación de biomasa de raíces.

Para evaluar la información disponible, la mayor parte de los autores diferencian los ecosistemas separándolos entre pisos altitudinales (temperatura) y provincias hídricas (lluvia). De los valores del Cuadro 4.6 y Figura 4.1 se puede generalizar que la biomasa total de los ecosistemas de llanura siempre verde, oscila entre 300 y 400 t.ha⁻¹. En algunos casos se han publicado para ecosistemas de llanura valores bastante bajos de fitomasa; generalmente ellos son explicables por las condiciones edáficas muy pobres; en los ecosistemas geográficamente contiguos del valle de Magdalena, encontraron así, Fölster *et al* 326 t.ha⁻¹ en condiciones de pendientes y 184 t.ha⁻¹ en condiciones de llanuras inundables (61, 62). Igualmente en los ecosistemas de San Carlos de Río Negro, en Venezuela, se encontraron respectivamente 324 y 243 t.ha⁻¹ para "tierra firme" y "caatinga" (Jordan y Uhl, Herrera y Klinge, 79, 80, 98, 99, 108, 109, Figura 4.1). En el caso del ecosistema de "bana" se trata de una vegetación especializada muy adaptada a las características de hidromorfismo del suelo y un desarrollo muy notable de raíces. En casos extremos se han encontrado en la literatura datos de biomasa de manglar que no pasan de 70 t.ha⁻¹ (Odum y Pigeon, 130).

Los valores de biomasa encontrados para ecosistemas siempre verdes estacionales o deciduos implican su disminución en función del proceso de caducifolia y el número de árboles por hectárea encontrados. Generalmente se han encontrado reservas entre 200 y 300 t.ha⁻¹. En ecosistemas secos deciduos o xerófitos las reservas orgánicas generalmente alcanzan valores menores que 100 t.ha⁻¹, en este caso la densidad de los árboles es determinante (71, 139, 141, 142, 165).

Cuadro 4.6. Reservas de materia de ecosistemas forestales tropicales de llanura siempreverdes (t.ha⁻¹); según diferentes autores).

Lugar, País	Autor	Viva	Muerta	Raíces	Mantillo	Suelo		TOTAL	Veget. Suelo
						Min. (cm)	cm		
FITOMASA AEREA									
<u>Kabo, Surinam</u>	Ohlert (133)	480	10	65	12	80(50)	644	--	--
<u>Pasoh, Malasia</u>	Kira (103)	475	99	--	--	140(100)	664	3,74	3,74
<u>Banco, Costa Marfil</u>	Huttel Reversat (14, 15, 16)	435	--	49	--	170(50)	634	8,85	8,85
<u>Cheko, Cambodia</u>	Hozumi (86)	415	--	70	--	--	--	--	--
<u>Mangos, Brasil</u>	Klinge (105, 106)	406	25	67	--	114(30)	612	4,37	4,37
<u>Lianos occident. Venezuela</u>	Hase Fölster (76)	398	--	--	9	76(50)	483	5,4	5,4
<u>Khaochong, Tailandia</u>	Ogawa <u>et al</u> (131)	365	--	32	--	--	--	--	--
<u>San Carlos Venezuela</u>									
<u>Terrafine Caatinga Bana</u>	Jordan Uhl Herrera Klinge (78, 79, 80, 95, 96, 97, 108, 109)	324 243 95	-- -- --	28 140 142	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --	-- -- --
<u>Darién Premontano Panamá</u>	Golley <u>et al</u> (70, 71, 72)	271	--	13	--	--	--	--	--
<u>Sabana Magdalena Llanura</u>	Fölster <u>et al</u> (61, 62)	316 184	15 5	11 9	-- 54	-- 135(50)	-- 387	-- 1,87	-- 1,87
<u>Colombia Depresión Kadé</u>	Greenland Kowal (73)	326 264	-- 72	-- 25	52 --	55(50) 87(30)	433 448	6,87 4,15	6,87 4,15

Brown y Lugo (20, 21) han evaluado la información mundial de las reservas de materia orgánica disponible de aproximadamente 40 ecosistemas de áreas tropicales y subtropicales de todos los pisos altitudinales y regiones hídricas. La biomasa forestal oscila entre 40 y 518 t.ha⁻¹ y presenta una relación inversa con un índice climático (relación temperatura/precipitación), alcanzando los valores máximos en bosques tropicales húmedos y disminuyendo en condiciones perhúmedas o más secas. Las reservas del suelo oscilan entre 24 y 600 t.ha⁻¹. Con base en las regresiones estadísticamente significativas Brown y Lugo (20) han calculado los valores de reservas de materia orgánica para ecosistemas por zonas de vida presentados en el Cuadro 4.7.

Cuadro 4.7. Reservas orgánicas promedios en ecosistemas forestales tropicales (t.ha⁻¹; según Brown y Lugo, 20).

Formación ecológica	Vegetación n (t.ha ⁻¹)	Suelo n (t.ha ⁻¹)	Mantillo n (t.ha ⁻¹)	Total (t.ha ⁻¹)
Tropical llanura muy húmeda	-- 344 (31)*	9 230 (64)	-- 6,0 (0,5)	580
Tropical húmedo	14 369 (27)	15 170 (12)	12 6,1 (0,6)	545
Tropical seco	-- 292 (21)*	7 142 (24)	-- 5,0 (0,5)	440
Subtropical, montano, muy húmedo	8 322 (20)	22 350 (60)	7 7,6 (1,6)	680
Subtropical húmedo	10 291 (29)	15 196 (32)	9 5,2 (0,9)	492
Subtropical seco	4 80 (22)	-- 78 (21)*	4 5,8 (1,3)	164

* Calculado en función de regresiones

Para interpretar la estabilidad de los ecosistemas es de gran utilidad el observar el índice que resulta al dividir las reservas orgánicas en la vegetación con las del suelo. Cuanto mayor es la reserva de la vegetación en el ecosistema (valores de la relación < 1) menor es la estabilidad del ecosistema cuando se piensa en una perturbación de la vegetación por causas naturales (viento, inundaciones, fuego, erupciones, derrumbes) o antropológicas (explotación, tumba y quema). Este cociente igualmente da cierta información sobre el grado de adaptación de la vegetación sobre el suelo. En el caso de que las reservas de la vegetación sean más altas que las del suelo se puede concluir que el desarrollo del sistema radicular es muy pobre y así la vegetación se desarrolla sobre el suelo y no en el suelo. El ciclo de la materia orgánica en este caso se localiza en la capa del mantillo y los procesos de producción y descomposición de la materia orgánica juegan un papel primordial en el ciclo correspondiente.

4.2.2. Producción y descomposición de residuos vegetales

La vegetación es una variable dependiente e independiente en el ecosistema. Su establecimiento y desarrollo en un área determinada depende de los factores ambientales y edafológicos (suelo, clima, organismos, relieve y tiempo). Después de su formación y al llegar a su estado clímax, o sea, un equilibrio con los factores ambientales, la vegetación suministra residuos vegetales como hojas, ramas, flores, frutos, raíces y tallos, que al descomponerse son incorporados al material mineral del suelo.

Para describir el ecosistema es necesario referirse a la formación vegetal como un actor estático y al estudio del ciclo de los minerales vegetales orgánicos como un factor dinámico. Los aspectos más importantes del ciclo de los residuos vegetales son (18, 50, 56, 71, 136, 165):

- Cantidad de los residuos vegetales agregados a cada unidad del suelo en un cierto período de tiempo
- Composición biogeoquímica de los residuos
- Procesos de descomposición y humificación de los residuos
- Liberación de CO_2 y elementos químicos

Cuadro 4.8. Distribución porcentual de materia orgánica de elementos nutritivos en ecosistemas forestales (según Fassbender, 49).

Lugar, País y Autor	Materia orgánica (t. ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg
Kodo, Ghana, 129						
Suma	4839	5655	80	1152	4260	610
% Vegetación	6	18	86	43	38	38
% Mantillo	1	1	14	1	1	1
% Suelo (25 cm)	93	81	-	56	61	61
Manaos, Brasil, 105						
Suma	514	7538	168	634	718	451
% Vegetación	92	40	39	72	70	57
% Mantillo	1	4	18	12	30	39
% Suelo (30 cm)	7	56	42	10	0	4
Sta. Fe. Panamá, 70, 71						
Suma	394	-	176	3456	26268	2685
% Vegetación	96	-	79	89	14	15
% Mantillo	4	-	8	1	1	1
% Suelo (50 cm)	-	-	13	10	85	84
Carare, Colombia, 61, 62						
Suma	372	6753	299	428	551	204
% Vegetación	50	11	9	65	78	65
% Mantillo	15	10	6	7	17	14
% Suelo (50 cm)	35	79	85	28	5	21
Nueva Guinea, 38, 39						
Suma	2220					
% Vegetación	6	7	79	61	33	34
% Mantillo	1	1	8	1	2	1
% Suelo (30 cm)	93	92	15	38	65	65
Mérida, Venezuela, 51, 74						
Suma	785	9074	1040	1771	1597	389
% Vegetación	51	12	683	83	56	65
% Mantillo	8	6		3	13	4
% Suelo (40 cm)	41	81		14	31	31

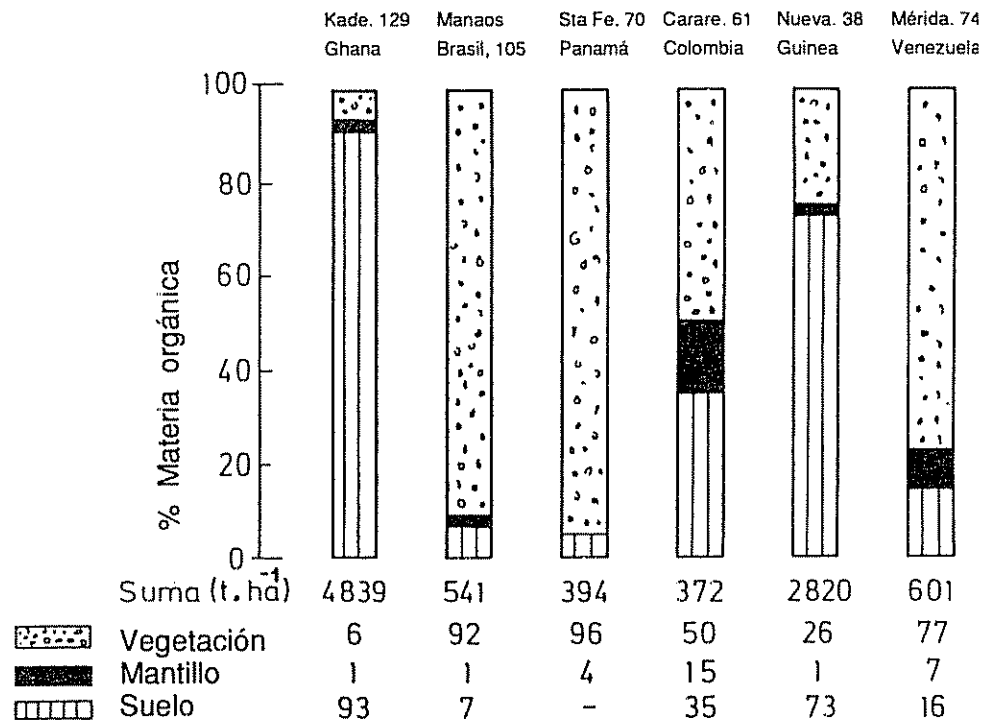


Figura 4.2. Distribución de la materia orgánica en ecosistemas tropicales (según Fassbender, 49).

La velocidad de la descomposición de los residuos y la formación de humus dependen de la actividad de los animales y microorganismos saprófagos del suelo, los estudios a este respecto son aún esporádicos. Los resultados de tales procesos son más accesibles ya que las formas del humus tienen estructuras definidas (capa de mantillo, materia orgánica del suelo mineral) que se pueden estudiar en detalle.

La intensidad del ciclo de la materia orgánica se puede expresar con el índice de transformación, determinado por Jenny (92) de acuerdo con la fórmula:

$$C = \frac{R}{R + H} \times 100$$

donde:

C = es el coeficiente porcentual de descomposición de los residuos vegetales

R = es la producción anual de residuos vegetales por unidad de superficie

H = es la cantidad de humus en la capa de mantillo por unidad de superficie

En regiones tropicales y subtropicales existen algunos estudios sobre la producción de residuos vegetales en ecosistemas forestales naturales. Una de las recopilaciones más exhaustivas es la de Bray y Gorham (18), quienes en cerca de 300 estudios a nivel mundial, incluyeron 20 áreas tropicales. La revisión más amplia reciente es la de Proctor (136, 137) quien evaluó 218 estudios realizados en el trópico entre 30°N y 30°S. Este autor indica que la evaluación es muy difícil ya que:

- Las fracciones de residuos no siempre han sido bien definidas
- El número y tamaño de trampas colectoras es muy variable (de dos a 20 trampas, entre 0,1 y 10 m²)
- El tiempo de los estudios es muy variable, entre varias semanas y años, recomendando que debe ser entre tres y cinco años
- Los tipos de bosques analizados son muy variables (pionero, en crecimiento, maduro, en degeneración).

En el Cuadro 4.9 se resumen los datos sobre la producción de residuos vegetales de acuerdo con la revisión de Proctor (136, 137). La interpretación solamente puede ser muy global, las tendencias son claras, los bosques siempreverdes de llanuras producen más residuos que los montanos. Los bosques deciduos se caracterizan igualmente por su menor producción de residuos. Las hojas contribuyen generalmente con 65 a 75 % del total de residuos.

Cuadro 4.9. Resumen de los datos de producción de residuos vegetales de ecosistemas forestales ($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$; en paréntesis número de estudios calculados, con base en Proctor, 137).

	0 - 10 °C	10 - 20 °C	20 - 30 °C
Bosques siempreverdes			
Llanura			
Total	10,46 (52)	8,50 (10)	7,72 (25)
Hojas	7,22 (41)	5,37 (8)	5,87 (11)
% hojas	69	63	76
Montanos			
Total	9,12 (23)	6,36 (22)	4,50 (3)
Hojas	5,74 (11)	4,85 (19)	----
% hojas	63	76	
Bosques decíduos			
Llanura			
Total	6,45 (22)	3,97 (7)	3,81 (10)
Hojas	4,31 (22)	1,44 (5)	2,56 (17)
% hojas	67	36	67

· Ecosistemas forestales montanos

Para el estudio de la producción de residuos vegetales en el ecosistema montano de San Eusebio, Mérida, Venezuela, se colocaron en cada una de las tres parcelas en estudio, doce trampas colectoras de $1 m^2$ (50). El muestreo de los residuos vegetales alcanzó en el año de estudios un total de $6,97 t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$, distribuyéndose de la siguiente manera:

hojas $3,88 t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ = 48 % del total

ramas $2,27 t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ = 33 % del total

flores y
frutos $1,09 t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ = 16 % del total

epífitas
 $0,23 t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ = 3 % del total

La producción de las hojas es bastante constante durante los meses estudiados, alcanzando un coeficiente de variación del 14,4 %. Las cantidades producidas en residuos provenientes de las flores y frutos presenta muy pequeñas variaciones entre los diferentes meses; ello es debido seguramente a la gran cantidad de especies encontradas y sus diferentes ritmos fenológicos.

La producción de restos vegetales a partir de las especies epífitas (bromeliáceas, aráceas, araliáceas y orquídeas) es, sin duda, algo excepcional, muy propio del ecosistema estudiado. La participación de las ramas en los residuos vegetales es bastante heterogénea en los diferentes meses, arrojando valores entre 28 y 656 kg por ha y por mes; ello conlleva a un coeficiente de variación de 64 % y, así, resulta para el total de la producción de residuos un coeficiente de variación de 22,7 %.

No es factible llegar a una interpretación definitiva sobre los factores determinantes del ritmo de producción de los residuos vegetales en función de los fenómenos ambientales.

También resulta difícil establecer comparación de la producción de residuos vegetales en diferentes ecosistemas forestales montanos, ya que la cantidad de datos disponibles es todavía muy reducida y la diferenciación en los diferentes compartimentos, especialmente flores y frutos y epífitas, hasta ahora casi no ha sido realizada. Los valores de San Eusebio, con $6,97 \text{ t.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$ se encuentran en el rango observado entre $4,78$ y $10,1 \text{ t.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$ en El Verde, Puerto Rico (130) y Chinchiná, Colombia (40), respectivamente. El valor del ecosistema de Rancho Grande (72) en los Andes de Venezuela ($7,8 \text{ t.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) es más alto que el de San Eusebio; ello es quizás explicable por su situación a una altura de sólo 1 000 msnm y otra serie de factores ambientales, especialmente la temperatura.

Es también muy interesante la comparación entre la producción de residuos vegetales y la biomasa de los diferentes compartimentos del ecosistema de San Eusebio (51). De la biomasa foliar total, de $4,6 \text{ t.ha}^{-1}$ en el ecosistema, se producen en un año residuos de $3,4 \text{ t.ha}^{-1}$; ello implica que 73 % de la masa foliar se renueva anualmente y que prácticamente cada año y medio se renuevan los órganos fotosintetizantes en el ecosistema.

La producción de residuos vegetales a partir de los tallos y raíces de la vegetación del ecosistema es, sin duda, un proceso importante del funcionamiento del ecosistema, pero de difícil cuantificación.

La determinación del aumento de la masa de tallos en el ecosistema arrojó un valor de $4,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$. Suponiendo que en el ecosistema, en su estado clímax, la tasa de anabolismo es equiparable a la del catabolismo, se puede con esta premisa indicar que la producción de residuos gruesos es de $4,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$.

La biomasa de las raíces finas en el ecosistema ha sido hasta ahora objeto de muy pocos estudios (105, 106); no existen hasta ahora informaciones sobre el ritmo de su muerte en ecosistemas tropicales. Las raíces con un diámetro menor de 5 cm alcanzaron una biomasa de $24,6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ y las observaciones correspondientes implican que casi el 80 % son raíces finas, tienen una tasa de renovación equiparable a la de las hojas del ecosistema (13 %) resulta de ello una tasa de producción de restos vegetales radicales de $3,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$.

· Ecosistemas de llanura

Se ha encontrado que la producción de residuos vegetales en ecosistemas forestales alcanza su valor máximo en bosques siempreverdes de llanuras ecuatoriales (Cuadro 4.9; 136, 137). El valor promedio es de $10,5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ y sin embargo presenta un ámbito muy grande de resultados; dependiendo de las condiciones biológicas (vegetación) y de los regímenes ambientales (energía, temperatura, agua, suelos).

Generalmente se observa que la producción de residuos de ramas y tallos permanece constante y que la fuente de mayor producción es el compartimento foliar.

Al disminuir el balance energético, bajo condiciones de 20 a 30° norte y sur disminuye la producción de residuos. Igualmente al encontrarse períodos de sequía (bosques deciduos) disminuye notablemente la producción de residuos vegetales (Cuadro 4.9).

La comparación de los valores de diferentes ecosistemas de llanura entre sí (Cuadro 4.10) o en comparación con los ecosistemas montanos es difícil, cada uno de los valores representa las condiciones específicas de estudios característicos del ecosistema.

· Transferencia de elementos químicos

Las tasas de transferencia de elementos químicos de la vegetación al suelo por unidad de superficie y tiempo ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) para algunos ecosistemas seleccionados se presenta en el Cuadro 4.10.

Cuadro 4.10. Producción de residuos vegetales de ecosistemas forestales tropicales seleccionados ($t \cdot ha^{-1}$) y transferencia de elementos nutritivos ($kg \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$) (según diferentes autores, ver Fassbender y Grimm 74; Proctor, 136).

Lugar, País (Autor)	Altura (m)	Lluvia (mm)	Temp. °C	Total Hojas $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$	N	P	K
						$kg \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$	
Ecosistemas montañosos							
San Eusebio, Venezuela (50)	2300	1500	13	7,0 ± 1,6	69	4,0	33
Chinchina, Colombia (90)	1630	2800	21	11,1	---	---	---
Río Grande, Venezuela (72)	1000	1800	19	7,8	---	---	---
San José, Costa Rica (33)	1980	---	---	2,7 ± 1,0	0,5	---	---
Coban, Guatemala (102)	1000	3000	19	10,0	7,3	---	---
	900			6,7	9,3	---	---
Blue Montains, Jamaica (158)	1500	2200	16	6,6	4,9	1,3	14
Mull				5,5	5,3	1,58	39
Wet				5,6	4,4	2,47	21
Gap				6,5	5,5	2,4	34
El Verde, Pto, Rico (130)	500	3800	22	5,1	---	1,1	---
Ecosistemas de llanura							
Igapo, Manaos, Brasil (1)	50	1800	27	6,8 ± 0,91	95	2,7	19
Terra Firme, Manaos, Brasil (104)	50	1800	27	7,9	106	2,1	13
Banco, Costa Marfil (10)	100	2100	26	11,9	158	13,6	81
Yapo, Costa Marfil (14)	70	2100	26	9,6	113	4,2	26
Kade, Ghana (129)	150	1700	28	---	199	7,2	68
Caparo, Venezuela (56)	100	1800	25	8,6 ± 2,3	129	12,0	60
Río Negro, Brasil (153)	50	1800	27	21,9	324	13,4	35
Darién, Panamá (71)	---	2000	25	11,4	---	8,6	128
				10,5	---	2,6	91
San Carlos, Venezuela (96, 99)	120	3500	26	5,8	---	---	---
Magdalena, Colombia (61, 62)	120	3200	28	8,7	103	3,4	29
				12,3	141	4,2	17

En el ecosistema de San Eusebio, Venezuela, de los elementos estudiados el nitrógeno tiene la mayor movilidad dentro del ecosistema. Durante el año en estudio se transfirieron $69 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de la vegetación al suelo. Dentro de los elementos mayores el fósforo presenta una tasa de transferencia bastante pequeña, llegando a sólo $4,0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$. Dentro de los elementos alcalinos y alcalinotérreos se observa la secuencia Ca, K, Mg, Na, con 43, 33, 14 y $0,27 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, respectivamente. En forma excepcional, el aluminio alcanza una tasa de transferencia bastante alta de $9,3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; ello se explica por la acidez de los suelos en estudio y la predominancia del aluminio en el complejo de intercambio catiónico (75).

Al comparar los datos encontrados en el ecosistema de San Eusebio con los hallados en otros estudios (Cuadro 4.10), se constata que los valores obtenidos son relativamente bajos. Así, para el nitrógeno, se encontró en El Verde, Puerto Rico, una tasa de transferencia de $88 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (130), comparable a la de San Eusebio ($69 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$); los demás estudios, especialmente en ecosistemas de llanura, arrojan valores entre 100 y $320 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$. Los valores de transferencia de P son siempre bajos, oscilando entre 1 y $14 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; en el caso de San Eusebio, $4,0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ es un valor promedio. Los valores de K, Ca y Mg presentan una gama más amplia que el N y P, ya que ellos dependen en mayor parte de la capacidad de intercambio y su saturación con bases en los suelos. Los valores más bajos encontrados pertenecen a un bosque de tierra firme en Manaos (110), los valores más altos corresponden a un ecosistema pluvial tropical en Santa Fe, Panamá (70, 71).

Descomposición de residuos

Para el estudio de la descomposición de residuos vegetales en ecosistemas generalmente se preparan muestras de hojas en marcos de madera (con tamíz arriba y abajo permitiendo la entrada y salida de microfauna), los cuales son colocados sobre el suelo y muestreados periódicamente en el transcurso de su descomposición. Las muestras se secan y con su peso remanente se calculan las curvas de descomposición (líneaal, exponencial) y la tasa correspondiente ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$).

Estudios al respecto en ecosistemas forestales tropicales hasta ahora son muy escasos. En los trabajos realizados en el ecosistema de San Eusebio (50, 51, 74) se colocaron sobre el suelo cerca del centro de las parcelas, 14 muestras de hojas y 14 de ramas frescas en marcos de madera (40 x 40 cm, con tamíz plástico de 1 cm de malla), las cuales a su vez fueron muestreadas con dos repeticiones cada dos

meses durante un año. Después de su secado (105°C, 24 horas) se determinó el peso seco para calcular la tasa de descomposición. Las muestras fueron mezcladas y preparadas para el análisis químico.

En la composición de las muestras expuestas se consideraron las hojas y ramas de las especies vegetales más frecuentes (74):

Pino laso (Podocarpus rospigliosii)

Copey (Ternstroemia acrodantcha)

Canalete (Eugenia spp.)

y bromeliáceas.

El peso inicial de las muestras frescas fue de 250 g para las hojas (equivalente a 119 g de materia seca, aproximadamente) y de 350 g para las ramas (peso equivalente a 336 g de materia seca).

La curva de descomposición, tanto para las hojas como las ramas, es lineal, existiendo una correlación estadísticamente significativa entre el peso restante de la muestra y el tiempo de descomposición ($r = -0,98$ para hojas y $r = -0,50$ para ramas). En los trabajos conducidos por Bernhard-Reversat (14) en la Costa de Marfil y por Edwards (38) en Papua, se ha encontrado la misma dependencia lineal; sin embargo, otros autores indican que la curva de descomposición de los residuos vegetales es exponencial.

La tasa de descomposición puede calcularse según las ecuaciones calculadas. Para el caso de San Eusebio (50), prolongando la línea de la descomposición de las hojas se llega al valor cero en 20 meses; ello implica que después de ese tiempo todas las hojas expuestas habrán sido descompuestas, de lo cual resulta una tasa anual de descomposición del 72 %. En el caso de las ramas, el período es de 151 meses (12 1/2 años) para su descomposición y la tasa es del 8% anual.

En casi todos los estudios sobre la descomposición de residuos vegetales encontrados en la literatura, se indica que la descomposición de las hojas se completa en los primeros 12 meses de exposición. Ello indica que los procesos de humificación y mineralización en ecosistemas es acelerado y no representa un factor limitante del reciclaje de elementos nutritivos. En algunos casos, por ejemplo en el ecosistema

de Río Negro (Venezuela, 78, 79) Herrera et al han demostrado que este proceso es muy rápido y que los microorganismos especializados pueden utilizar casi directamente los elementos nutritivos, especialmente el fósforo.

Indices de transformación de los residuos vegetales

Los índices de transformación de la materia orgánica calculados de acuerdo con Jenny (92) han sido evaluados por Grimm y Fassbender (50). Los valores bajos indican que existe una acumulación de materia orgánica en la capa de mantillo o una disminución de la descomposición de los residuos.

Los valores de ecosistemas montanos encontrados fueron respectivamente de 15, 48, 54 y 68 % en los ecosistemas de San Eusebio (51), El Verde (Pto. Rico, 130), Kerigoma (Papua, 159) y Rancho Grande (Venezuela, 72).

En los ecosistemas forestales de llanura se encontraron aún valores más altos, a veces superiores al 80 %; ello indica que prácticamente cada 15 meses se descomponen los residuos vegetales que se encuentran en el mantillo del suelo.

4.2.3. Productividad de los ecosistemas

Para caracterizar a las productividad de los ecosistemas se utiliza la productividad primaria neta definida como la suma de (100, 122):

- el incremento de la biomasa
- la renovación de la biomasa muerta, o sea, la cantidad de residuos producidos
- la tasa de consumo directo por herbívoros

Estos valores aditivos se calculan como materia seca por unidad de área y espacio ($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$).

La productividad total primaria incluye a la productividad primaria neta y las tasas de respiración gastadas para el mantenimiento de todos los procesos energéticos del ecosistema.

La información esporádica encontrada para ecosistemas tropicales ha sido evaluada por Brown y Lugo (20) y por Medina y Klinge (100). La determinación de la productividad primaria total implica la determinación de las tasas de respiración, la cual es muy complicada; existen determinaciones puntuales (especies, condiciones climáticas, etc.), pero de ellas es muy difícil hacer cálculos generales ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$). Tecnologías microclimáticas (intercambio del CO_2) también presentan limitaciones.

El cálculo aditivo de las tasas de producción primaria neta es más generalizado. Los valores encontrados en la literatura (20, 100) han sido sumariados en el Cuadro 4.11. De acuerdo con Jordan (100) estos valores dependen directamente del balance energético, encontrando un aumento gradual de áreas templadas a zonas ecuatoriales.

Cuadro 4.11. Producción primaria neta de algunos ecosistemas forestales tropicales ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; según Brown y Lugo, 20; Jordan, 100; fuentes originales de diferentes autores).

Lugar, país, autor	Incremento de biomasa aérea	Renovación de raíces	Producción de residuos			TOTAL
			Hojas	Otros	Madera	
<u>Ecosistemas de llanura</u>						
Pasoh, Malasia	5,3	5,5	7,0	1,4	7,1	27
Kade, Ghana (73, 129)	11,9	2,6	7,0	3,5		25
Banco, Costa Marfil (14, 15, 16)	4,6	0,7	8,2	1,1	2,6	17
San Carlos, Venezuela (99, 100, 122)	--	2,0		6,2	3,4	12
<u>Montanos</u>						
El Verde, Pto, Rico (130)	0,8	2,1	5,0	6,6		15
San Eusebio, Venezuela (50, 51, 74, 75)	4,3	3,2		7,0		15

En ecosistemas tropicales de llanuras se han calculado tasas de producción primaria neta entre 12 y 27 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; el valor más alto fue encontrado en Pasoh, Malasia; el valor de 12 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ en San Carlos refleja las condiciones pobres del lugar de estudio.

En ecosistemas montanos la productividad neta es más baja, en los dos ecosistemas estudiados se encontró un valor de 15 $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$.

4.2.4. Modelo del ciclo de la materia orgánica

Con base en los datos obtenidos sobre las reservas de la materia orgánica en los diferentes compartimentos del ecosistema y las tasas de transferencia entre los mismos se puede postular el modelo de la materia orgánica correspondiente.

A manera de ejemplo se presenta en la Figura 4.3 el ciclo de la materia orgánica para el ecosistema forestal montano de San Eusebio, Venezuela, con base en los datos de Fassbender y Grimm (50, 51) y Grimm y Fassbender (74, 75). Para la descripción correspondiente se consideró una profundidad del suelo de 40 cm; ello debido a que las raíces finas responsables de la absorción del agua y de los elementos nutritivos forman una zona de enraizamiento intensiva en esa profundidad, a profundidades mayores en el suelo disminuyen las raíces finas. El total de materia seca en el ecosistema (suelo 0-40 cm) fue de $785 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ distribuidas así: 51 % en la vegetación, 8 % en el mantillo (con madera muerta) y 41 % en el suelo. La única fuente de ganancia de materia orgánica es la fotosíntesis, pero la tasa de productividad neta anual no se pudo determinar pues la edad del bosque no era conocida. Fuentes de pérdidas maderables no existieron en el ecosistema ya que se trata de bosques primarios sin utilización antropológica; solo existen fuentes de transformación por medio de la producción de residuos vegetales; un caso sui generis del ecosistema en estudio es la madera muerta como un eslabón entre la producción y deposición de materia orgánica.

La producción de hojarasca y residuos vegetales finos ($7,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) es bastante importante pues su tasa de descomposición es alta (70 % de la producción anual). Los residuos de tallos y raíces alcanzan $4,8$ y $3,2 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ respectivamente y así en total ingresan a la capa de mantillo $15,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$. La velocidad de descomposición de los residuos es en general alta pues solo se encontraron en total $38,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, de las cuales la mayor parte estaba en su fase de humificación. La forma del mantillo corresponde a un "moder" producto de procesos de transformación rápidos en función de las temperaturas, de las condiciones hídricas, de la disponibilidad de elementos químicos y de una actividad microbiana bastante intensa. Con base en las tasas anuales de descomposición de los residuos de hojas y ramas se han calculado la descomposición y la acumulación de sustancias húmicas orgánicas en el suelo mineral.

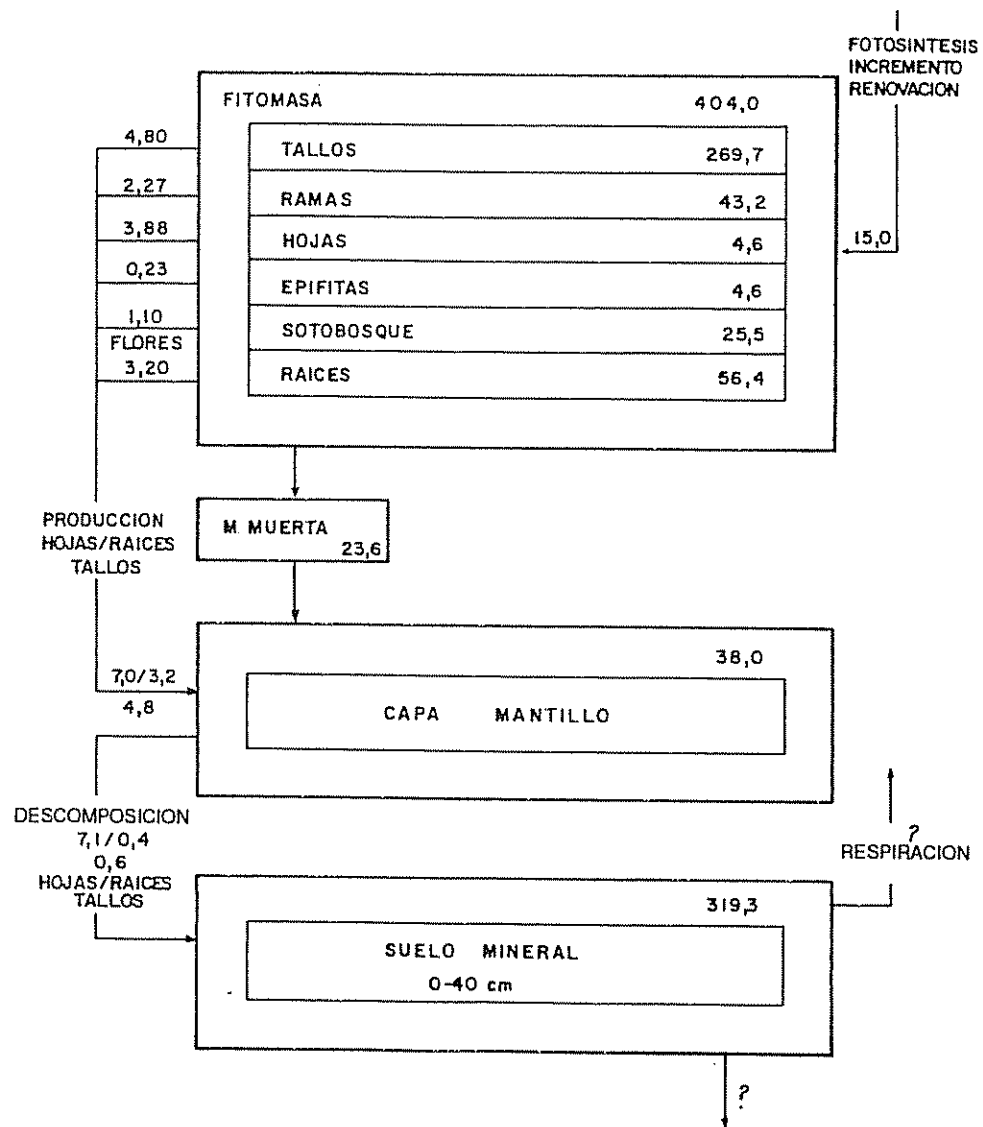


Figura 4.3. Ciclo de la materia orgánica en el ecosistema montano de San Eusebio, Venezuela (adaptado de Grimm y Fassbender; Fassbender y Grimm, 50, 51, 74, 75; reservas $t \cdot ha^{-1}$; transferencias $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$).

La materia orgánica se acumula así paulatinamente en el suelo mineral siendo la absorción directa por las plantas nula y la pérdida por respiración de microorganismos desconocida. En todo caso los contenidos son bastante altos (0-20 cm 5,5 %) y de ello resulta, como fue discutido anteriormente, una alta acumulación en el ecosistema. Esto es el resultado de la adaptación gradual por medio de la evolución de la vegetación a las condiciones del sitio, especialmente las características climáticas y edafológicas. En el ecosistema de San Eusebio no se han detectado fuentes de pérdida de la materia orgánica del suelo, los procesos de erosión eólica o hídrica bajo las condiciones de estudio son nulas. La vegetación controla la velocidad de caída de las gotas de agua de lluvia y regula al viento en circulación.

Basados en los resultados presentados (Cuadro 4.4) existe una adaptación marcada entre las condiciones hídricas del suelo, las características fisiográficas (relieve, inclinación), las reservas orgánicas y minerales del suelo y las reservas de la vegetación, la cual caracteriza al ecosistema. Por ello, el funcionamiento y las estructuras de todos los ecosistemas, en condiciones tropicales y subtropicales, es el resultado de la integración de todos los factores en la naturaleza.

Como una indicación de la estabilidad de los ecosistemas se puede considerar la distribución de la materia orgánica en sus compartimentos. En el caso de San Eusebio en el suelo se localiza el 41 % de las reservas orgánicas. La relación entre los componentes aéreos bióticos (vegetación, sin raíces) y componentes subterráneos bióticos (raíces, mantillo) y abióticos (suelo) es de 1,00: 1:19. Así cuando se produce una perturbación de la vegetación por causas naturales (derrumbes, fuego, etc.) o antropológicas (explotación, tumba y quema), quedan en el suelo reservas para sostener el ciclo de la materia orgánica y elementos nutritivos de una vegetación secundaria.

Una limitación grande de los estudios presentados y del ciclo de la materia orgánica es la falta de información sobre la zoomasa (productores secundarios, descomponedores, detritófagos) y los procesos de transformación de la materia orgánica. Informaciones al respecto han sido consideradas por Golley (71, 72), especialmente en los ecosistemas de Darién, Panamá.

El funcionamiento del ecosistema es sostenido por el proceso de fotosíntesis que permite compensar el incremento, la renovación y la respiración de la vegetación. El valor encontrado de $15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ es alto pero dentro del rango encontrado para ecosistemas forestales tropicales y subtropicales. Considerando todos los procesos de ganancia y pérdida del ecosistema se pueden indicar tasas equiparables

de las cuales resulta un funcionamiento sostenido e integral del sistema en forma permanente. El modelo desarrollado tiene un carácter integral, completo u holístico, permitiendo una descripción adecuada del sistema.

La materia orgánica juega un papel importante dentro del ecosistema, ella representa no solo el humus del suelo sino también parte de los elementos nutritivos y tiene influencia sobre el agua del ecosistema. Los ecosistemas hasta ahora descritos y estudiados en áreas tropicales se caracterizan por su autosuficiencia adaptada a las condiciones de sitio respectivas. La materia orgánica, los elementos nutritivos y el agua son el "capital" de los ecosistemas naturales y el punto de partida para su utilización por el hombre.

4.3. La materia orgánica en agroecosistemas

4.3.1. Tala, quema, agricultura migratoria

Cualquier intento de explotación de los bosques, empieza con su tala y quema, que en primera instancia produce una interrupción en el ciclo natural de nutrimentos y en especial el de la materia orgánica, debido a que se interrumpe la producción de residuos vegetales y ya no ocurre su degradación y mineralización. Además el suelo queda expuesto a los fenómenos climáticos que causan diversos problemas como la erosión hídrica.

El proceso de tala empieza normalmente al final de la época lluviosa con el fin de aprovechar la época seca para facilitar la quema de los restos vegetales y poder sembrar antes de la siguiente temporada de lluvias.

Los efectos de la quema son muy variados, siendo el primero el calentamiento superficial del suelo que conlleva a la destrucción de parte del mantillo. Además, disturba diversas propiedades del suelo y también la población microbiana del mismo.

La temporada que se desarrolla en estas quemas depende de factores tales como cantidad de fitomasa, tipos de restos vegetales, disposición de los restos (dispersión o amontonamiento), grado de humedad, factores climáticos como humedad del aire, precipitación en el momento de la quema y vientos que atizan el fuego (48, 49, 54, 56).

Las temperaturas desarrolladas son variables y sobrepasan los límites biológicos, que conducen a la esterilización parcial del suelo, reduciendo la actividad microbiana. Valores de 60°C ya son críticos, pues producen la desnaturalización de las proteínas. A temperaturas de 80 a 100°C se acelera la oxidación de la materia orgánica con producción de CO₂ que pasa a la atmósfera. También el N asociado a la materia orgánica se desprende en forma de óxidos a temperaturas mayores de 300 a 400°C; así también se pierden ciertas cantidades de azufre. En caso extremo se producen temperaturas de hasta 800°C (48, 49).

Los otros elementos, en especial el P, K, Ca y Mg se acumulan en las cenizas, que se depositan en el suelo para reaccionar posteriormente con el agua produciendo formas iónicas, con lo cual aumenta la disponibilidad, pero a su vez son más susceptibles al lavado. Todos estos procesos de oxidación llevan a cambios en el pH (48, 49).

Es difícil hacer un balance exacto de las pérdidas de elementos nutritivos por la quema, ya que las temperaturas varían por los varios factores expuestos, lo mismo que las cenizas varían con los fenómenos climáticos y solamente un muestreo muy sistemático sería confiable.

Bajo los sistemas de explotación rotativa ("shifting cultivation") se tiene una utilización corta e intensiva del suelo seguida de una etapa de regeneración de su fertilidad. Es un hecho comprobado en los trópicos, que la fertilidad de los suelos y las cosechas disminuyen rápidamente después de la tumba y quema de los bosques y de la explotación del mismo. En casos extremos se ha informado de una disminución del 86 % de la producción en una segunda cosecha de maní en el Congo (Figura 4.4; 145). El grado de disminución de la fertilidad depende de las características del suelo (contenido de humus, nitrógeno y otros elementos nutritivos, contenido de arcillas, pH, grado de agregación de las partículas, número y actividad de los microorganismos), de la secuencia o rotación de los cultivos (los monocultivos llevan a una degradación acelerada), de la intensidad de explotación y de las prácticas de cultivo y control de la erosión utilizadas y desarrolladas. La pérdida de la fertilidad de los suelos se debe también a diversos procesos, entre ellos: falta de restos vegetales para la mineralización; el aumento de las enfermedades y parásitos; cambios en las propiedades físicas del suelo, especialmente del régimen hídrico y de la aireación; pérdidas de elementos nutritivos tanto por extracción de los cultivos y lavado, como por erosión; pérdidas de humus por erosión y escorrentía y cambios en el ambiente microbiológico del suelo. Estos procesos por lo general ocurren todos juntos y la degradación de la fertilidad es el resultado colectivo, muy

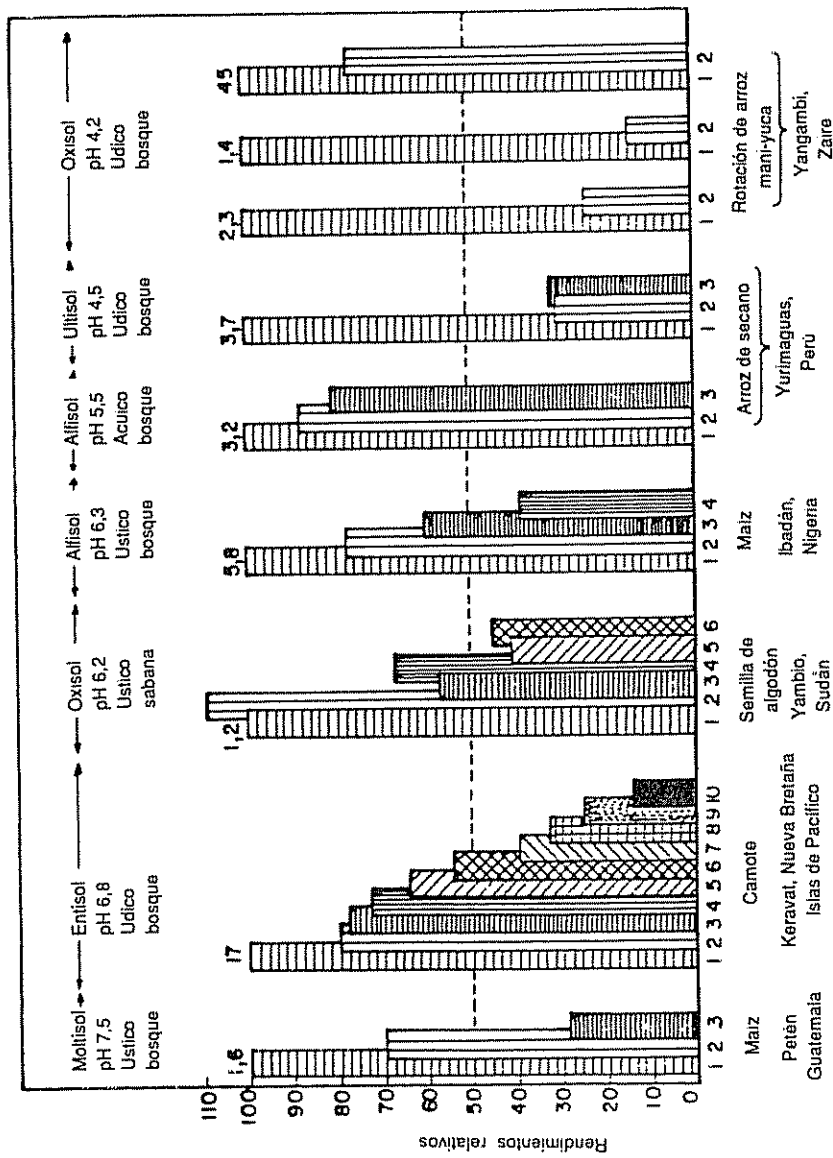


Figura 4.4. Ejemplos de descensos de rendimientos en cultivos continuos de agricultura migratoria (según Sánchez, 1985).

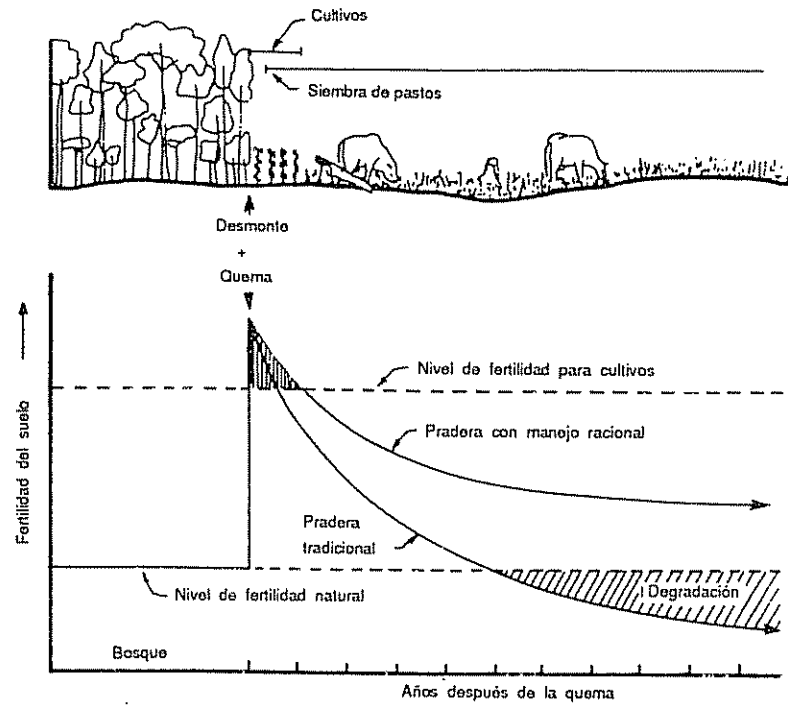


Figura 4.5. Modelo de los cambios de la fertilidad del suelo al transformar la vegetación de bosque en pradera (según Toledo y Serrao, 1963).

pocas veces es posible indicar una sola causa en el fenómeno (Figuras 4.4, 4.5, 4.7). Generalmente después de una explotación intensiva del suelo, entre 2 - 5 años se alcanza un grado total de agotamiento de la fertilidad de los suelos de tal forma que los agricultores optan por abandonar la parcela y tratan de encontrar una nueva para iniciar un nuevo ciclo de explotación, lo que da la nota típica del sistema rotativo en el uso agrícola del suelo (Figura 4.7).

Algunos autores han tratado de evaluar matemáticamente el agotamiento del suelo, la pérdida de fertilidad y/o la disminución de los contenidos de C y N en los suelos en explotación rotativa (Cuadro 4.12).

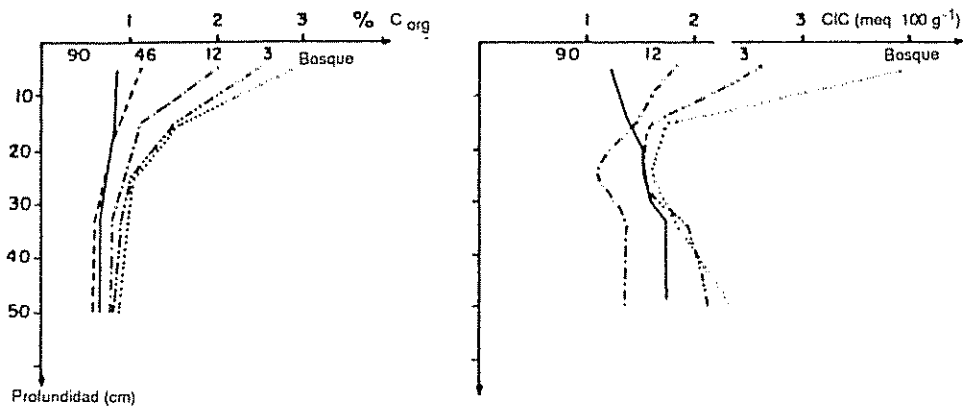


Figura 4.6. Cambios de la materia orgánica (% C) y de la capacidad de intercambio catiónico (CIC, meq. 100 g⁻¹) de bosque a 3, 12, 46 y 90 años de uso agrícola, en Casamance, Senegal (según Siband, 149).

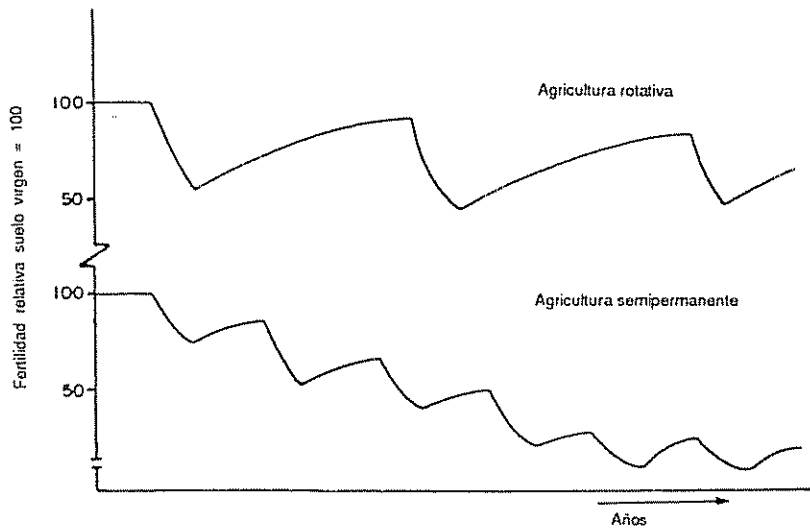


Figura 4.7. Representación esquemática de la fertilidad de los suelos en función del sistema de explotación agrícola (según Fassbender y Bornemisza, 54).

Cuadro 4.12. Comportamiento del C y N en los suelos agrícolas bajo explotación. Disminución del contenido de C y N bajo diferentes condiciones climáticas y sistemas de cultivos (según Jagnow; ver Fassbender y Bornemisz, 54).

	Lugar	Lluvia mm	Explotación	Años	Muestra	pH	%C	%N	Disminución porcentual anual de humus (*)
1	Trinidad	2000	Explotación rotativa ("Shifting")	---	Inicial Final		1,57 1,15	0,06 0,05	14,5
2	Trinidad	2000	Maíz-leguminosa	6	Inicial Final	6,1	1,02 0,84	0,13 0,11	3,2
3	Ghana	2080	Maíz-yuca	8	Inicial Final	6,0	2,19 1,50	0,164 0,128	4,8
4	Ghana	1500	Yuca	6	Inicial Final	5,7 6,0	2,12 1,63	0,191 0,148	4,4
5	Sri Lanka	1500	Explotación rotativa	2	Inicial Final	7,4 7,4	2,55 2,15	0,218 0,187	8,3
6	Ghana	1500	Suelo desnudo	3	Inicial Final	6,9 6,8	2,41 1,44	0,230 0,117	25,0 15,8
7	Uganda	1350	+ cobertura bajo cacao	3 3	Inicial Final	6,6 6,2	1,71 3,30	0,178 0,292	2,5
8	Kenia	1020	Algodón-sorgo -crotalaria	17	Inicial Final	6,0	0,97	0,080	6,5
9	Senegal	1300	Maíz-mucuna	4	Inicial Final	7,7 6,1	1,20 0,42	0,13 0,04	23,1
10	Ghana	1300	Sorgo-mañi	6	Inicial Final	6,4 5,4	0,75 0,50	0,15 0,15	6,8
			Ñame-mañi-camote	6	Inicial Final	6,2 5,7	0,36 0,28	0,034 0,025	4,0

(*) La disminución porcentual anual de C es calculada según la fórmula $\frac{\Delta C}{C_{\text{final}}} = K \cdot C_{\text{final}}$ donde la disminución de humus en t años, al nivel C_{final} de acuerdo a una constante de proporcionalidad K.

En las parcelas abandonadas se produce una recuperación progresiva a largo plazo de las condiciones del suelo y de su fertilidad. La duración de la regeneración es de ocho a 30 años, aunque bajo condiciones favorables del suelo se puede acortar bastante. En esta etapa de "descanso" del suelo se desarrolla un bosque secundario, se acumulan de nuevo elementos nutritivos en la vegetación, se restablece la producción de restos vegetales y su mineralización y el suelo alcanza finalmente su fertilidad original (Cuadro 4.12, Figura 4.7).

4.3.2. Materia orgánica en sistemas de producción agrícola y pecuaria

El contenido de materia orgánica en agroecosistemas -agrícolas o pecuarios- en forma de monoculturas se puede caracterizar por un lado, con una productividad de los cultivos y pastos en muchos casos muy elevada y por el otro, por una disminución progresiva del contenido de humus en el suelo.

La información de la producción de materia de los cultivos se refiere generalmente a los productos de cosechas. Existen algunos ejemplos sobre la producción total de los cultivos, aunque dentro de los residuos de cosechas generalmente se omiten los datos correspondientes a la biomasa radicular. De acuerdo con el Cuadro 4.13, originalmente publicado por Sánchez (145), los cereales y leguminosas de grano presentan los rendimientos más bajos dentro de los cultivos agrícolas. Sin embargo, su importancia como fuente alimenticia (maíz, arroz, frijoles) es obvia y cosechas de 1 a 5 t.ha⁻¹ se pueden considerar satisfactorias. Las cosechas dependen del material genético y del manejo de las plantaciones. Las raíces alimenticias (yuca, camote, papa) se caracterizan por sus altos rendimientos y la producción equiparable de residuos vegetales. Algunos de los cultivos agrícolas de exportación (algodón, café, té, tabaco, caucho, cacao, coco) producen cantidades pequeñas de materia orgánica pero de un valor comercial elevado. Algunas especies frutales (piña, banano, palmera aceitera) se caracterizan por una producción de materia orgánica cosechada muy elevada. Dentro de los cultivos agrícolas la caña de azúcar presenta los mayores rendimientos de cosecha (hasta 300 t.ha⁻¹) en función de la utilización de los tallos.

La producción de materia orgánica de las gramíneas forrajeras, especialmente de corte, es muy elevada: de acuerdo con la recopilación de Sánchez (145) oscila entre 8 y 46 t.ha⁻¹.a⁻¹.

Cuadro 4.13. Producción de materia orgánica y remoción de nutrientes por los principales cultivos tropicales. (según Sánchez, 145).

Cultivo	Parte	Rendimiento (ton/ha)*	Nutrientes				
			N	P	K	Ca	Mg
CEREALES							
Maíz	Grano	1,0	25	6	15	3,0	2,0
	Tallo	1,5	15	3	18	4,5	3,0
	Total	2,5	40	9	33	7,5	5,0
	Grano	4,0	63	12	30	8,0	6,0
	Caña	4,0	37	6	38	10,0	8,0
	Total	8,0	100	18	68	18,0	14,0
	Grano	7,0	128	20	37	14,0	11,0
	Caña	7,0	72	14	93	17,0	13,0
	Total	14,0	200	34	130	31,0	24,0
Arroz	Grano	1,5	35	7	10	1,4	0,3
	Paja	1,5	7	1	18	2,6	2,2
	Total	3,0	42	8	28	4,0	2,5
	Grano	8,0	106	32	20	4,0	1,0
	Paja	8,0	35	5	70	24,0	13,0
	Total	16,0	141	37	90	28,0	14,0
Trigo	Grano	0,6	12	2,4	2	0,3	1,0
	Paja	1,0	3	0,8	14	2,0	2,0
	Total	1,6	15	3,2	17	2,3	3,0
	Grano	5,0	80	22	20	2,5	8,0
	Paja	5,0	38	5	60	10,0	10,0
	Total	10,0	118	27	80	12,5	18,0
Sorgo	Grano	1,0	20	0,9	4	4,0	2,4
	Paja	1,2	6	0,4	2	4,6	3,2
	Total	2,2	26	1,3	6	8,6	3,6
	Grano	8,0	135	10	27	16,0	9,6
	Paja	8,0	65	4	13	18,0	12,8
	Total	16,0	200	14	40	34,0	22,4
Mijo	Grano	1,1	17	5	59	-	-
RAICES ALIMENTICIAS							
Yuca	Rafces	8,0	30	10	50	20	10
	Rafces	16,0	64	21	100	41	21
	Rafces	30,0	120	40	187	77	40
	Planta entera	59,0	64	19	176	102	26
	Rafces	59,0	42	28	291	43	19
Papa	Rafces	12,0	52	10	80	22	14
	Rafces	22,0	120	20	166	40	26
	Rafces	40,0	172	34	232	70	48
	Planta entera	62,0	147	19	403	60	31
	Tubérculos de planta anterior	44,0	77	14	224	4	9
Camote	Rafces	16,5	72	8	88	-	-

Continuación Cuadro 4.13.....

Cultivo	Parte	Rendimiento (ton/ha)*	Rendimiento (ton/ha)*				
			N	P	K	Ca	Mg
LEGUMINOSAS DE GRANO							
Frijoles	Granos	1,0	31	3,5	6	-	-
Soya	Granos	1,0	49	7,2	21	-	-
Maní	Vainas y granos	1,0	49	5,2	27	-	-
Pastos (producción anual, cortado cada 2 meses)							
Guinea	Parte aérea	10,0	107	27	180	78	48
(<u>Panicum maximum</u>)	Parte aérea	23,0	288	44	363	149	99
Pangola	Parte aérea	35,0	560	77	600	230	133
(<u>Digitaria decumbens</u>)	Parte aérea	10,0	120	22	180	36	28
Elefante	Parte aérea	23,0	299	47	358	109	67
(<u>Pennisetum purpureum</u>)	Parte aérea	31,0	400	53	558	130	87
Pará	Parte aérea	10,0	144	24	180	35	30
(<u>Brachiaria mutica</u>)	Parte aérea	25,0	302	64	504	96	63
	Parte aérea	46,0	800	92	900	129	87
	Parte aérea	8,0	80	17	160	28	16
	Parte aérea	24,0	307	43	383	115	79
	Parte aérea	30,0	600	69	660	135	66
OTROS CULTIVOS							
Caña de azúcar (cosechas de 2 años)	Parte aérea	100	75	20	125	28	10
	Parte aérea	200	149	29	316	55	58
	Parte aérea	300	254	35	400	96	80
Algodón	Semilla	0,8	30	4,4	7	-	-
Café	Granos secos	1,0	25	1,7	16	1	2
Té	Hojas secas	0,6	31	2,3	15	2	-
Tabaco	Hojas curadas	1,0	116	14	202	-	-
Caño	Látex seco	3,0	7	1,2	4	4	-
Cacao	Almendras secas	0,5	10	2,2	5	1	1
Palma aceitera	Fruto	15,0	90	8,8	112	28	-
Banano	Racimo	10,0	19	2,0	54	23	30
	Tallo y hojas	-	20	1,3	22	1	3
	Total	-	39	3,3	76	24	33
	Racimo	30,0	56	6,0	161	70	82
	Tallo y hojas	-	29	4,0	65	2	8
	Total	-	85	10,0	226	72	90
Piña	Fruto	12,5	9	2,3	29	3	-
Coco	Copra seca	1,2	60	7,2	40	-	-

(*) Rendimientos de cereales, leguminosas de grano y pastos con base en peso seco, cultivos de raíces y banano con 15 a 20% de materia seca

El manejo y utilización de los residuos de cosecha vegetales (Cuadro 4.13, 145) puede ser decisivo en la dinámica de la materia orgánica en el suelo y de la conservación de su fertilidad. La extracción o remoción de los residuos o su quema implican pérdidas muy grandes de humus y parcialmente de elementos nutritivos (N, S). Al utilizar los residuos como material de cobertura -"mulch"- no solo se garantiza el reciclaje de la materia orgánica y elementos nutritivos (humificación, mineralización) sino también se logran efectos secundarios importantes como la protección del suelo (insolación directa, aceleración del proceso de humificación, lluvias = erosión), mejoramiento de las condiciones microclimáticas (microorganismos) y físicas (aireación, retención de agua).

Bajo los sistemas agrícolas semipermanentes (barbecho reducido) y permanentes se observa que el contenido de materia orgánica y nitrógeno disminuyen rápidamente (Capítulo 4.3.1., Cuadros 4.1 y 4.2); en los ciclos alternados y sucesivos de explotación y descanso se produce una degradación muchas veces irreversible de la fertilidad de los suelos.

Una limitación muy grande para la interpretación y evaluación de todos los procesos involucrados, es la falta de ejemplos sobre el contenido de la materia orgánica a largo plazo bajo diferentes condiciones ambientales y de cultivos. En suelos de Casamance, Senegal (oxisoles, 1200 mm lluvia) Siband (149) encontró, como muchos otros autores, que la disminución del contenido de humus del suelo es rápida en los primeros años de producción agrícola, sin embargo, después de 90 años de utilización continua del suelo (cultivo de maní, maicillo sin reutilización de residuos) no se ha logrado un equilibrio del humus y la capacidad de intercambio del suelo (Figura 4.6).

La disminución progresiva de la fertilidad de los suelos (pH, C, N, cationes cambiabiles) bajo pastizales de la región Amazónica (Paragominas), ha sido confirmada en estudios a largo plazo (15 años) por Toledo y Serrao (163, Figura 4.5); quienes indican que la degradación de la fertilidad es prácticamente irreversible.

La única manera de contrarrestar las pérdidas de materia orgánica y de fertilidad de los suelos es desarrollar sistemas adecuados de producción sostenida conservadores del humus del suelo, con base en combinaciones de especies vegetales y sus rotaciones, utilización óptima de residuos de cultivos, mejor uso de fertilizantes orgánicos y minerales, técnicas de conservación del suelo.

4.3.3. Manejo agronómico de la materia orgánica

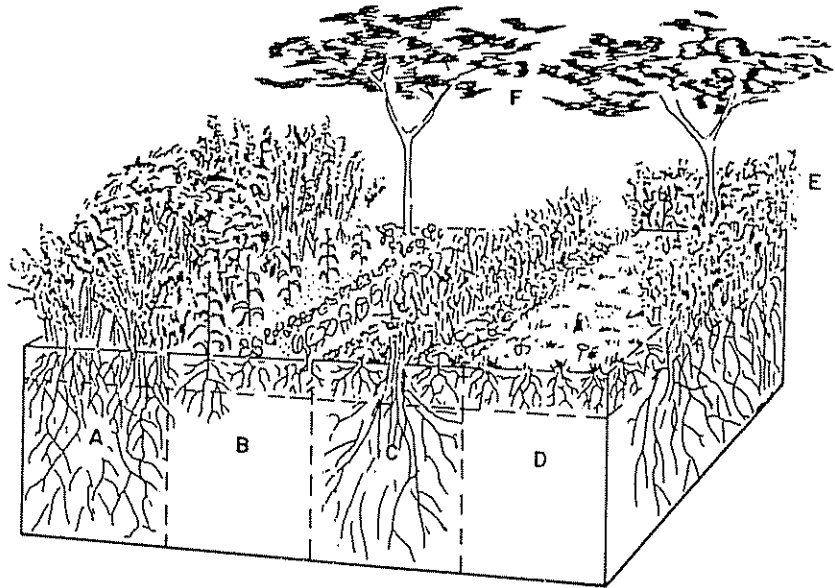
Manejo de los barbechos

La recuperación de la fertilidad de los suelos de las parcelas abandonadas después de una fase de agricultura migratoria o de su degradación por su explotación agrícola intensiva (semipermanente o permanente) es lenta. Los objetivos de una fase de recuperación o regeneración, generalmente asociada a la formación de un bosque secundario son:

- Recuperación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo a través de la producción de materia orgánica, acumulación de elementos nutritivos (efecto de extracción de profundidades del suelo), control de su lixiviación, restablecimiento del reciclaje (producción de residuos vegetales), cobertura del suelo ("mulch") y fijación de nitrógeno (leguminosas).
- Control de malas hierbas, plagas y enfermedades a través del desarrollo de arbustos y árboles (control de luz, número de especies múltiples), originalmente pioneros y después característicos del bosque secundario.
- Producción de madera para leña, construcciones, carbón; producción de frutos, forraje, alimentos, carne de animales combinados, sombra, residuos vegetales de cobertura, etc. En la etapa final de la vegetación secundaria se obtiene un bosque de regeneración muchas veces comparable en su contenido de materia orgánica al bosque primario.

En el manejo agronómico de los barbechos se tienen las siguientes posibilidades (Prinz, 1985):

- Intensificación de la regeneración con la utilización sucesiva de especies de enriquecimiento de la materia orgánica, especialmente leguminosas (Figura 4.8, A).
- Mejoramiento de la regeneración con cultivos agrícolas (en hileras, Figura 4.8 B con maíz, frijoles, taro; líneas de arbustos leguminosos, Figura 4.8, C) con pastizales (Figura 4.8, D) ("ley farming") o especies arbóreas para cercas vivas o productoras de madera (Figura 4.8, E, F).



- A: Intensificación de la regeneración con la introducción simultánea de leguminosas
- B: Mejoramiento con cultivos (Maíz, frijoles, taro)
- C: Mejoramiento con pastos y leguminosas forrajeras y su uso para alimento de ganado ("ley farming")
- D: Mejoramiento con pastoreo, cercas vivas, producción de madera

Figura 4.8. Enriquecimiento del barbecho con diferentes manejos agronómicos (según Prinz, 135).

Para los barbechos manejados se necesitan especies que se caracterizan por:

- Desarrollo rápido para cubrir el suelo, controlar las malas hierbas, disminuir la erosión.
- Alta producción de biomasa, características de composición (relación C/N) adecuadas, alto contenido en elementos nutritivos.

- Extracción de elementos nutritivos de horizontes profundos del suelo, posibilidad de fijación de N.
- Manejo favorable en su aradura, poco peligro de dispersión, control de enfermedades de otras especies (alelopatía).
- De ser posible productos secundarios deseables (alimentos, leña, madera, etc.).

Desde luego las especies más favorables son leguminosas, entre ellas se tienen buenas experiencias con las siguientes:

- Rastreras o trepadoras bajas: Pueraria phaseoloides, Desmodium intortum, Mucuna utilis, Centrosema pubescens, Calopogonium muconoides, Mimosa invisa, Phaseolus lunatus,
- Trepadoras altas, anuales o bianuales: Cajanus cajan, Crotalaria spectabilis, Crotalaria juncea, Sesbania cannabina, Tephrosia vogelii.
- Arbustivas perennes (típicas de sistemas de producción agroforestales, ver Capítulo 2.5): Leucaena leucocephala, Gliricidia sepium, Sesbania bispinosa, Tephrosia candida, Calliandra calothyrsus, Sesbania saman, Sesbania grandiflora.

· Rotación de cultivos

La rotación de cultivos consiste en ocupar el suelo con cultivos diferentes en arreglos sucesivos temporales que permitan optimizar las cosechas y mantener la fertilidad de los suelos. Mediante la rotación de cultivos se trata de aprovechar las tierras agrícolas disponibles tratando de mantener una cobertura productiva durante el mayor tiempo posible y a un costo mínimo de producción, aprovechando al máximo el trabajo manual de la familia campesina.

Es una práctica muy antigua, la cual, utilizada apropiadamente, contribuye de modo eficaz a controlar la erosión y a mantener la productividad de los suelos. El efecto benéfico de la práctica depende de la selección que se haga de las plantas que van a rotarse y de la secuencia que se siga en su siembra. Una buena rotación siempre debe incluir leguminosas y praderas artificiales por un tiempo más o menos largo, según la susceptibilidad del terreno a la erosión.

Este principio hace resaltar la importancia de combinar en la finca la agricultura y la ganadería, para un buen equilibrio en el uso de los terrenos.

Entre las ventajas de las rotaciones deben mencionarse (145):

- Aumento de la producción de biomasa verde que se involucra en los procesos de mineralización y humificación.
- Fijación de nitrógeno por las leguminosas.
- Mejora de la estructura del suelo y de su capacidad de retención de agua.
- Utilización racional de los elementos nutritivos al intercalar diferentes sistemas radiculares.
- Cobertura del suelo durante todo el año y control de la erosión.
- Control de plagas y enfermedades.
- Mejor utilización de fertilizantes y materiales de enmienda.
- Distribución racional de la mano de obra.

Para la selección de las especies de las rotaciones de cultivos deben considerarse las características del desarrollo de las plantas (necesidades de agua y elementos nutritivos, ritmo de crecimiento, desarrollo radicular, susceptibilidad a la luz, producción, interacciones entre especies) y las condiciones ambientales (clima, suelo) para obtener resultados favorables de producción vegetal, protección del suelo y mantenimiento de la fertilidad.

Las rotaciones de cultivos son locales, ajustándose a las formas tradicionales regionales de agricultura. Por ello es difícil dar ejemplos generales.

• Residuos vegetales y animales

Como fue indicado anteriormente, el manejo de los residuos de cosecha puede ser decisivo para el mantenimiento de la fertilidad de los suelos, especialmente al considerar su humificación, mineralización y la cobertura del suelo. Existen muchos ejemplos favorables al respecto en áreas tropicales y subtropicales (56, 135, 145).

La utilización de residuos animales (orinas, heces) y productos mezclados (composta) depende de las condiciones específicas del manejo de la ganadería. En condiciones de pastoreo de praderas resulta

una distribución heterogénea de los residuos; bajo condiciones de estabulado se pueden recolectar los residuos y se utilizan en forma óptima en los huertos caseros.

Sobre la utilización de residuos urbanos -basuras, aguas negras e industrias- se tiene muy poca experiencia en áreas tropicales y subtropicales.

- Abonos verdes

Con la incorporación de abonos verdes se logra una acumulación grande de materia orgánica y elementos nutritivos, especialmente de nitrógeno al usarse leguminosas, en el suelo. Además de mejorar las propiedades químicas del suelo se obtienen ventajas para las propiedades físicas (aireación, agregación, retención de agua, etc.).

La aplicabilidad de estas prácticas depende de muchos factores; en muchos casos la distribución y cantidad de lluvias (períodos de sequedad) son su factor limitante. Por otro lado la situación socioeconómica del campesino es decisiva; la época cultural de las plantas de abonos verdes implican una fase "improductiva" la cual puede ser definitiva. La disponibilidad de mano de obra y sus costos para el trabajo extra con el cultivo verde deben considerarse dentro de la finca. La aceptación de esta práctica, así como la de todas las prácticas de mejoramiento de la materia orgánica, depende muchas veces de las tradiciones y usos agrícolas regionales.

Las especies utilizadas para abono verde generalmente son leguminosas, su aplicabilidad es netamente regional y determinada por las tradiciones agronómicas específicas. Entre ellas se pueden considerar como ejemplo (NAS, 127; Duke 37):

- Leguminosas herbáceas: Crotalaria juncea, Indigofera hirsuta, Stylosanthes spp. (hamata, humilis, guianensis).
- Leguminosas rastreras, medio trepadoras con vainas comestibles: Canavalia ensiformis, Dolichos lab lab, Vigna unguiculata, Vigna radiata, Vigna sinensis, Schizolobium deeringianum, Glycine spp.
- Leguminosas trepadoras, cobertoras del suelo: Mucuna spp, Pueraria phaseoloides, Centrosema pubescens, Clitoria terneata, Indigofera spicata, Canavalia gladiata, Desmodium intortum, Cassia spp.

- Leguminosas arbustivas (sistemas agroforestales): Cajanus cajan, Tephrosia candida, Tephrosia vogelii, Calliandra calothyrsus, Sesbania bispinosa.

Lógicamente existen especies de gramíneas y otras familias que pueden utilizarse para abonos verdes. Ellas y también las malas hierbas pueden considerarse como plantas para la cobertura viva del suelo ("live mulch"). En algunos casos también se acostumbra a cosechas materiales de cobertura en parcelas anexas ("ratoon cropping") para utilizarlas en cultivos agrícolas.

Como se ha indicado anteriormente el uso de esta práctica es muy especializada dentro de las regiones agrícolas y grupos de campesinos. En el Cuadro 4.14 se presentan como ejemplo datos sobre la producción de materia orgánica de leguminosas utilizadas como abono verde en Brasil (FAO, 45).

Cuadro 4.14. Producción de materia seca de 15 leguminosas utilizadas como abonos verdes en Brasil (según Vaz, et al., en FAO, 45)

Leguminosas	Producción (t.ha ⁻¹)
<u>Crotalaria juncea</u>	10,53
<u>Canavalia ensiformis</u>	7,70
<u>Schizolobium aterrimum</u>	6,86
<u>Crotalaria paulina</u>	6,76
<u>Schizolobium deeringianum</u>	6,39
<u>Crotalaria spectabilis</u>	2,25
<u>Cajanus cajan</u>	5,63
<u>Dolichos lab-lab</u>	4,67
<u>Indigofera tinctoria</u>	2,52
<u>Sesbania aculeata</u>	2,19
<u>Tephrosia candida</u>	1,88
<u>Schizolobium niveum</u>	1,36
<u>Cyamopsis psoralioides</u>	0,60
<u>Clitoria termatea</u>	0,58
<u>Crotalaria grationa</u>	0,48

4.3.4. Materia orgánica en bosques secundarios

Tal como se ha indicado anteriormente, en la mayor parte de los casos, la regeneración vegetal de parcelas abandonadas después de su explotación agrícola o pecuaria, culmina en la formación de un bosque secundario. Este proceso conocido también como sucesión ecológica es un proceso continuo de adaptación de los componentes bióticos y abióticos del ecosistema, cuya duración depende de las condiciones de clima y suelo así como de la disponibilidad de plantas y animales que colonizan el sitio.

En el Cuadro 4.15 se presentan algunos detalles de los componentes arbóreos en las diferentes etapas de la regeneración, las cuales Budowski (23) ha descrito como fase pionera, de bosque secundario joven y bosque secundario avanzado.

En la regeneración vegetal natural se producen cambios paulatinos en el ciclo de la materia orgánica y de los elementos nutritivos. De la acumulación de biomasa de la vegetación resulta una aceleración del reciclaje de la hojarasca en la capa de mantillo y del humus en el suelo mineral y con ello el restablecimiento del ciclo de los elementos nutritivos. La velocidad de estos procesos depende del suelo (situación después de su uso: exhaustación y degradación), del clima (agua de lluvias, régimen hídrico, temperaturas) y de la vegetación.

En la Figura 4.9 se presentan resultados sobre la biomasa de bosques secundarios y su acumulación de elementos nutritivos obtenidos en Colombia, Guatemala, Panamá, Ghana y Zaire, (60). La acumulación de biomasa más o menos es rápida; a la edad de 16 a 20 años se lograron valores de 120 a 200 t.ha⁻¹; en el caso de Carare, Colombia, la biomasa del bosque secundario fue más elevada que la del bosque primario original.

En la Figura 4.9 se observan también los resultados de almacenamiento de elementos nutritivos en bosques secundarios; a la edad de 16 a 20 años, se registraron 400 a 800 kg N, 40 a 60 kg P, 300 a 350 kg K y 300 a 700 kg Ca + Mg por hectárea. A excepción del N las reservas de elementos nutritivos de los bosques secundarios en Carare, Colombia, fueron más altos que los de los bosques primarios.

Cuadro 4.15. Características de los componentes arbóreos de bosques secundarios tropicales (según Budowski, 23; ver también Fournier, 65).

	Pionero	Secundario joven	Secundario avanzado
Edad de las comunidades observadas en años	1 - 3	5 - 15	20 - 50
Altura. metros	5 - 8	12 - 10	10 - 30 algunos 50
Número de sp leñosas	pocas 1 - 5	pocas 1 - 10	30 - 60
Composición florística de los dominantes	Euphorbiaceae <u>Cecropia</u> , <u>Ochroma</u> , <u>Trema</u>	<u>Ochroma</u> , <u>Cecropia</u> , <u>Trema</u> , <u>Heliocarpus</u> los más frecuentes	mezcla. muchas Meliáceas. Bombacáceas. Tiliáceas
Distribución natural de los dominantes	muy amplia	muy amplia	amplia-incluye zonas áridas
Número de estratos	1. muy denso	2. bien diferenciados	3. difíciles de separar con la edad
Dosel superior	homogéneo, denso	ramificación verticilada. copas delgadas horizontales	heterogéneo. incluye copas amplias
Estrato inferior	denso, entramado	denso. especies herbáceas grandes frecuentes	relativamente escaso. incluye especies tolerantes
Crecimiento	muy rápido	muy rápido	dominantes rápido, otros despacio
Vida promedio de los dominantes	muy corta. menos de 10 años	corta de 10-25 años	usualmente de 40-100 años algunos más
Tolerancia a la sombra de los dominantes	muy intolerantes	muy intolerantes	tolerantes en los estados juveniles, intolerantes más tarde
Madera y tallo de los dominantes	muy liviana. poco diámetro	muy liviana, diámetros menos de 60 cms	liviana a semi-dura. algunos tallos grandes

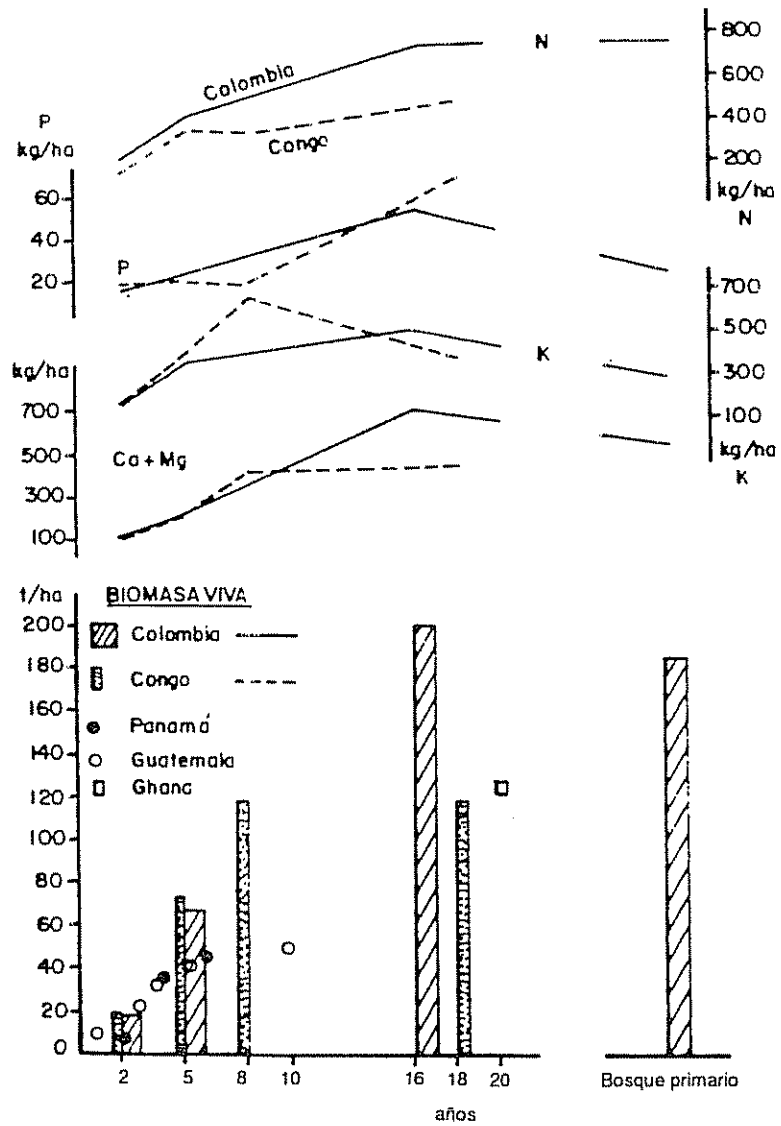


Figura 4.9. Biomasa y elementos nutritivos en bosques secundarios (según Fölster y Fassbender, 60).

4.3.5. Materia orgánica en plantaciones forestales

Como fue indicado con anterioridad (Capítulo 2.2.3) en plantaciones forestales paulatinamente se establece un círculo completo de la materia orgánica y de los elementos nutritivos. El desarrollo de las diferentes especies dependen de sus características intrínsecas, su adaptación, las características del sitio (suelo, clima) y del manejo de la plantación (silvicultural, fertilización, etc.). Generalmente se observa un desarrollo sinusoidal, el crecimiento inicial es relativamente pequeño, después de una fase acelerada se llega a la culminación de la plantación con tasas de crecimiento menores. La utilización de la madera de las plantaciones depende de los objetivos y las especies de producción, generalmente entre 10 y 40 años; el raleo necesario en el manejo de la plantación es intenso y así se obtienen productos iniciales (postes, leña, etc.) de la plantación. De ello, resulta muy difícil la comparación de la información sobre la materia orgánica en plantaciones forestales; más aún la mayor parte de las mediciones realizadas se refieren al incremento de la madera de tallos (Cuadro 4.16).

El incremento y desarrollo de las plantaciones forestales depende de la integración de todas las características del sitio como medida de la productividad potencial de un lugar forestal. Tschinkel (1964, ver también Fassbender y Tschinkel, 1974) propuso el "Índice de sitio", el cual se definió, en plantaciones de ciprés (Cupressus lusitanica) en la Cordillera Central de Antioquia, Colombia, como la altura en metros que los árboles dominantes alcanzan a la edad de 15 años. Para la confección de las curvas del índice de sitio se analizaron 57 rodales, cuyo crecimiento fue calculado a una edad comparativa de 15 años (Figura 4.10). Se formaron cinco clases de sitio, en las cuales la altura de los árboles dominantes alcanzó 9, 12, 15, 18 y 21 m. El volumen de la madera total producida alcanzó entre 40 y 250 m³.ha⁻¹ (Figura 4.10).

Para pronosticar el índice de sitio (15 m de altura) se puede evaluar la pendiente del terreno (en grados, P) y la convexidad o concavidad topográfica (C). Con estas dos variables se describió el crecimiento potencial según la fórmula:

$$S = 9,28 + 0,133 C - 0,145 P$$

Con estos factores se describe en 72 % la variabilidad del crecimiento del ciprés en la región.

Cuadro 4.16. Incremento de madera en plantaciones forestales tropicales (t.ha⁻¹.a⁻¹; según la recopilación de Jordan, 1990).

Especie/	Región ecológica	País	Número rodales	Mínimo	Máximo	Promedio
<u>Pinus patula</u>		Kenya	1	2,5	12,5	7,5
		Uganda	1	2,5	12,5	7,5
<u>Pinus caribaea</u>		Venezuela	1	4,2	5,6	4,9
		Puerto Rico	3	11,0	29,5	20,2
		Países Caribe	13	1,4	51,2	18,4
<u>Eucalyptus deglupta</u>		Nva. Guinea	4	11,8	29,6	20,7
<u>Gmelina arborea</u>		Malawi	?	4,3	12,8	8,5
		Sierra Leona	4	4,9	6,2	5,5
<u>Antocephalus cadamba</u>		Indonesia	varios	5,2	8,4	6,8
--Exóticos tropicales		Filipinas	varios	13,3	28,0	20,7
	tropical húmedo		15	1,6	25,0	5,5
América	tropical seco		5	3,0	7,0	4,7
Latina	subtropical muy húmedo		3	10,1	59,0	27,4
	subtropical húmedo		7	2,5	17,0	10,7

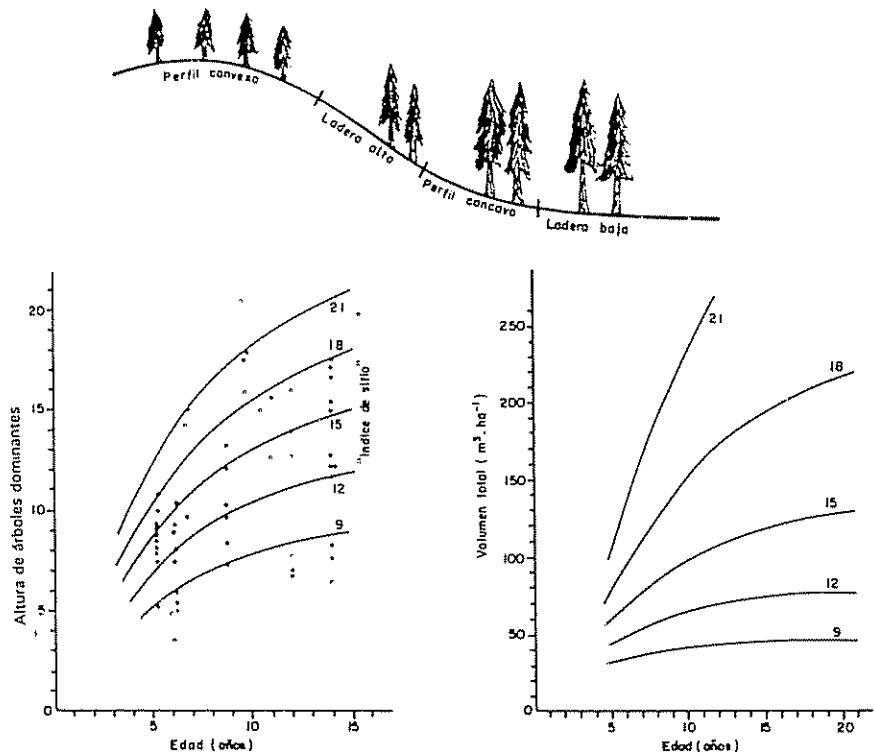


Figura 4.10. Producción de madera de Cupressus lusitanica en Antioquia, Colombia en función del "sitio forestal" ($m^3 \cdot ha^{-1}$, según Tschinkel, 164, ver también Fassbender y Tschinkel, 47).

Con el desarrollo de la plantación forestal se establece el reciclaje de la materia orgánica y de los elementos nutritivos. Los procesos que intervienen en la transferencia de materia orgánica son la producción de residuos vegetales, la formación de la capa de mantillo con los procesos de humificación y mineralización y la incorporación en el suelo mineral (horizonte Ah). Para los elementos nutritivos además se deben considerar las transferencias con el agua (lluvia, lavaje foliar y de tallos, escorrentía, almacenaje en el suelo, filtración con el agua freática). Así el ciclo es cerrado, completo y complejo.

La información disponible sobre la materia orgánica en plantaciones forestales de áreas tropicales y subtropicales es muy limitada. En el Cuadro 4.17 se presentan los resultados obtenidos por Navarro (128) sobre la determinación de biomasa área de Eucalyptus deglupta a la edad de ocho años en Turrialba, Costa Rica. La plantación

fue establecida a un distanciamiento de 3 x 3, a la edad de cuatro años fue raleada en un 44 % (no existen datos de biomasa). A los ocho años los árboles medidos alcanzaron un dap promedio de 21,1 + 3,9 cm y una altura de 24,1 + 2,7 m; el volumen total con corteza fue de 235 m³.ha⁻¹. Con una densidad de 490 árboles por hectárea se obtuvo a los ocho años una biomasa total seca de 105 t.ha⁻¹. En mediciones comparables de Australia y Nueva Zelandia (ver Cannel, 27) se han encontrado valores más bajos.

Cuadro 4.17. Biomasa de Eucalyptus deglupta a la edad de ocho años en Turrialba, Costa Rica (t.ha⁻¹, según Navarro, 128).

	Peso fresco	Peso seco
Hojas	5,7	2,7
Ramas tiernas	2,8	1,3
Tallos finos (5 cm)	11,5	5,6
Tallos (5 cm)	208,0	95,0
TOTAL	228,0	104,6

El crecimiento rápido y la acumulación notable de materia orgánica en pino caribe (Pinus caribaea) lo demuestran los valores encontrados por Egunjobi y Bada (40) en Ibadán, Nigeria (Cuadro 4.18). A la edad de 10 años la plantación acumuló la materia orgánica equiparable a 185,6 t.ha⁻¹ en la vegetación, de las cuales 97,4 t.ha⁻¹ se encontraron en la madera y corteza y 19,7 t.ha⁻¹ en la capa de mantillo. El aumento de biomasa total entre el noveno y décimo año de la plantación alcanzó un valor de 50 t.ha⁻¹. Este es uno de los valores más altos de productividad neta de comunidades vegetales encontrados en la literatura.

En condiciones húmedas tropicales de Java, Indonesia, Bruijnzeel y Wiersum (22) encontraron en una plantación de Agathis dammara de 40 años una biomasa aérea de 599 t.ha⁻¹, en el transcurso de los raleos se extrajeron 331,9 t.ha⁻¹ (Cuadro 4.19). El incremento de biomasa aérea promedio del ciclo de producción alcanza así 25 t.ha⁻¹.a⁻¹. La biomasa de las hojas en los árboles en pie alcanzó un valor de 36,7 t.ha⁻¹, el cual se considera muy elevado.

Cuadro 4.18. Biomasa de plantaciones de pino caribe (*Pinus caribaea*) en Ibadán, Nigeria ($t \cdot ha^{-1}$); según Egunjobi y Bada, 40)

Edad de la plantación (años)	6	8	9	10
Número de árboles por hectárea	2637	2390	2767	2866
DAP (Promedio + desviación, cm)	12,20 + 2.9	10,50 + 4.1	12,63 + 3.5	13,99 + 3,2
Area basal ($m^2 \cdot ha^{-1}$)	30,80	20,67	34,64	44,02
Biomasa ($t \cdot ha^{-1}$)				
Hojas	9,8	9,1	15,7	20,2
Ramas	8,3	6,4	12,3	16,8
Madera	35,9	35,1	10,8	76,5
Corteza	7,9	7,1	25,6	20,9
Raíces	77,6	71,7	133,6	178,6
Subtotal	139,5	129,3	201,9	242,9
Madera muerta				
Mantillo	3,7	4,6	17,3	19,7

Cuadro 4.19. Biomasa aérea y de raleo y elementos nutritivos en una rotación de 40 años de *Agathis dammara* en Java, Indonesia (t.ha ó kg.ha⁻¹ ; según Bruijnzeel y Wiersum, 22).

	Hojas	Ramas		Tallo	Corteza	Total
		gruesas	finas			
Biomasa en pie (t.ha ⁻¹)	36,7	55,5	28,6	452,6	26,0	599,5
Biomasa de raleos (t.ha ⁻¹)	24,6	33,4	19,1	240,9	13,9	331,9
Total (t.ha ⁻¹)	61,3	88,9	47,7	693,5	39,9	931,4
Ca (kg.ha ⁻¹)	1,184	0,382	0,453	0,659	0,638	3,316
Mg	0,242	0,80	0,136	0,153	0,96	0,706
K	0,466	0,295	0,334	0,437	0,122	1,654
P	0,68	0,57	0,76	0,107	0,40	0,348
N	0,778	0,213	0,249	1,179	0,123	0,542

Los cambios de la materia orgánica medidos por Lundgren (117) en un ciclo de producción (40 años) de *Pinus patula* en regiones montañas de Tanzania se representa en la Figura 4.14. El desarrollo de la biomasa es gradual, sinusoidal, en un ciclo de 40 años alcanzó los siguientes valores ($t \cdot ha^{-1}$): tallos de cosecha final y raleos 748 (70% del total), ramas 181, raíces 94 y mantillo 40, obteniendo un total de $1064 t \cdot ha^{-1}$. La materia orgánica en el suelo solo presentó cambios ligeros. La biomasa total producida de más de $1000 t \cdot ha^{-1}$ es más alta que la de los bosques primarios (Cuadro 4.6).

La producción de residuos vegetales en plantaciones forestales depende de la característica de caducifolia de las especies y las condiciones climáticas (épocas de sequía). Según la recopilación de datos por Lundgren (117) se encuentran valores en el rango de 2 a $11 t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$, los valores más frecuentes son de 6 a $8 t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$.

4.4. Materia orgánica en sistemas de producción agroforestales

4.4.1. Modelo de sistemas agroforestales

Como se ha indicado en los capítulos anteriores, en las últimas décadas se ha brindado especial atención al desarrollo de modelos para describir ecosistemas y sistemas de producción del sector agrícola. Las técnicas de modelación de la materia orgánica y los elementos nutritivos han sido también aplicados a sistemas de producción agroforestales; existen estudios especiales relacionados con la asociación de árboles de sombra con café (Capítulo 4.4.2) y también con cacao (Capítulo 4.4.3) en sistemas agroforestales de callejones o fajas (Capítulo 4.4.6) y otros (Capítulos 4.4.7 y 4.4.8). Los criterios utilizados para estudiar estos ciclos difieren entre los autores e igualmente existe una diferenciación muy notable en el grado de utilización de los resultados. Un aspecto básico de las ventajas de los sistemas agroforestales está ligado a la necesidad de sistemas de producción agrícola sostenida (Capítulos 4.4.5 y 4.4.4) y de compatibilidad con el medio ambiente.

Los conceptos básicos para la formulación de los modelos se basan en una evaluación de las reservas en cada uno de los compartimentos dentro de límites establecidos, la medición de las interacciones y transferencias y también de sus ganancias y pérdidas (56).

La acumulación de materia orgánica a través del proceso de fotosíntesis y de elementos nutritivos por medio de la absorción se reflejan en la biomasa de los sistemas de producción agroforestales (56).

La diferencia de los componentes depende notablemente de los intereses del investigador, generalmente se han considerado componentes abióticos como el suelo mineral y la capa de mantillo y los componentes bióticos, o sea, las especies involucradas en el sistema de producción agroforestal. Existe discrepancia en la diferenciación de los compartimentos vegetales (p.ej. hojas, ramas, tallos, raíces, flores y frutos) y especialmente en el suelo (horizontes y segmentos y profundidad del estudio).

Las interacciones entre los diferentes componentes de un sistema se describen a través de los fenómenos dinámicos de transformación de la materia orgánica en el sistema por medio de la deposición de residuos (producción natural y por podas) y su descomposición (mineralización y humificación) en la capa de mantillo. Otras fuentes de ingreso consideradas son la lluvia con los elementos químicos que ingresan al sistema con el agua, la fertilización con diferentes elementos nutritivos y la fijación de nitrógeno. Como fuentes de egreso del sistema se consideran también el agua de drenaje con la cual pasan elementos nutritivos al agua freática del suelo, el transporte lateral (erosión) del suelo y las cosechas del sistema como frutas y leña (56).

Como base de resultados para describir los ciclos de la materia orgánica y de los elementos nutritivos se utilizan en esta obra los datos obtenidos en el Experimento Central del CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza) en Turrialba, Costa Rica. En este experimento iniciado en 1977, se realizan desde 1981 dentro del programa de investigaciones del Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ (Sociedad Alemana de Cooperación Técnica) trabajos para analizar y describir los siguientes sistemas de producción agroforestales (2, 3, 4, 8, 11, 12, 41, 52, 53, 55, 55, 56, 57, 83, 84, 90, 91):

- Café (Coffea arabica) con poró (Erythrina poeppigiana)
- Café (C. arabica) con laurel (Cordia alliodora)
- Cacao (Theobroma cacao) con poró (Erythrina poeppigiana)
- Cacao (T. cacao) con laurel (Cordia alliodora)
- Pasto estrella (Cynodon plectostochyus) con poró (Erythrina poeppigiana)

4.4.2. Materia orgánica en sistemas de café con árboles de sombra

· Inventario de las reservas de materia orgánica

La cuantificación de la materia orgánica y los elementos nutritivos implican su medición en la biomasa y mantillo y la determinación del humus y los elementos nutritivos en el suelo (2, 53, 55, 83, 90). Generalmente existe información de la fitomasa; datos sobre la fauna, especialmente del suelo, casi no existen.

En el Experimento Central del CATIE (41, ver Capítulo 3.4.3) se plantaron en parcelas de 18 x 18 m con cuatro repeticiones al azar, matas de café, en agosto de 1977, con una distancia de siembra de 1 x 2 m (5000 plantas por ha). El laurel se sembró con una distancia de 6 x 6 m (278 árboles por ha) y el poró con una distancia de siembra de 3 x 6 m (555 árboles por ha).

En marzo de 1982 (edad 4,5 años) se realizó la determinación de biomasa del café, poró y laurel en las parcelas correspondientes. Se escogieron en total 36 arbustos de café por sistema, o sea nueve por parcela, pertenecientes a las hileras centrales. Para cada arbusto se midió el largo y diámetro de los tallos a diferentes alturas, el número total de hojas y el número total de ramas plagiotrópicas (bandolas). En muestras compuestas se determinó el porcentaje de humedad. El volumen de los tallos se multiplicó por su peso específico ($0,33 \text{ g.cm}^{-3}$ medido con un barreno de Pressler) (2).

Los datos de la biomasa del poró se basaron en la medición de todos los tallos de las parcelas y la determinación de su peso específico básico ($0,24 \text{ g.cm}^{-3}$, medido con barreno de Pressler). La biomasa de ramas y hojas se basó en el material de las podas (febrero y setiembre de 1982), en las cuales se cortó todo el material existente a 2,6 m de altura, se anotaron los pesos frescos totales de ocho árboles, se secaron 16 muestras en una estufa y con el porcentaje de humedad se calcularon los pesos por hectárea (2).

La biomasa de los tallos del laurel se calculó basándose en la altura y diámetro de los árboles de las parcelas y en el peso específico de la madera ($0,44 \text{ g.cm}^{-3}$ medido con un barreno de Pressler). La biomasa de hojas y ramas se determinó en ocho árboles del experimento (2).

Para determinar la biomasa de raíces finas ($0 < 20 \text{ mm}$) se utilizó un anillo metálico (27,4 cm de diámetro y 15 cm de altura) que

se introdujo en el suelo a profundidades de 0-15, 15-30, 30-45 cm, con 16 repeticiones por tratamiento. Las raíces se separaron del suelo con agua a presión normal. Las muestras se secaron y pesaron y así se calculó la biomasa por hectárea.

La materia orgánica de la capa de mantillo se determinó utilizando un marco de madera de 0,25 m², haciéndose 16 repeticiones por tratamiento. Las muestras del material en descomposición se secaron y pesaron para calcular su peso por hectárea. Las muestras del suelo mineral (0-15, 15-30, 30-45 cm de profundidad) se analizaron en base a su contenido de humus y en función de su peso específico se calculó la reserva orgánica por hectárea.

Las muestras obtenidas fueron analizadas químicamente para determinar los otros elementos químicos N (Kjeldal), P (digestión nitroperclórica) y K, Ca y Mg totales (digestión nitroperclórica) para las muestras de biomasa y cambiables (acetato de amonio) para las muestras de suelos.

Para la caracterización de los suelos experimentales que pertenecen a la Serie Instituto Fase Normal, con topografía plana de origen fluvio-lacustre y clasificado como typic dystropept se presentan los valores del Cuadro 4.20.

Los resultados de las reservas de materia orgánica acumuladas en los sistemas se han resumido en el Cuadro 4.21. Las reservas acumuladas en la vegetación son comparables (41,5 y 38,1 t.ha⁻¹) a pesar del número desigual de árboles y del manejo de los mismos. En el caso del laurel se pretende producir madera (en cinco años $h = 11,9$ m; $d = 26,9$ cm; madera = 54 m³, biomasa seca = 23,8 t.ha⁻¹), la cual constituye la mayor parte de la reserva (57%). El poró tiene otras funciones: producción de sombra, producción de residuos vegetales como materia de cobertura del suelo y fijación de nitrógeno. De ellas resulta seguramente la mayor fitomasa del café bajo sombra de poró (15,2 t.ha⁻¹) que bajo sombra de laurel (7,9 t.ha⁻¹).

La comparación de los datos de biomasa con otros sistemas agroforestales de cafeto es bastante difícil debido a las diferencias en las zonas ecológicas, suelo, densidades y edades de los cafetos y de los árboles de sombra, manejo del cafeto como de la sombra. El valor encontrado por Goldberg y Jiménez Avila (69, Veracruz, México) en 3600 arbustos de café 16,7 t.ha⁻¹ y 50 árboles de sombra 27,9 t.ha⁻¹ se aproxima a los datos de Alpízar *et al* (2). Los valores de Aranguren *et al* (5) en 5597 arbustos de café con 40,5 t.ha⁻¹ (4, Caracas, Venezuela) se alejan de los valores antes mencionados.

Cuadro 4.20. Características químicas de los suelos de los suelos del Experimento Central de CATIE, Turrialba, Costa Rica (tratamiento café con poró, promedio de cuatro muestras, según Alpizar, et al., 2).

Profundidad (cm)	Densidad aparente g. cm ⁻³		pH		Humus %		Nitrógeno %		Fósforo total mg P.kg ⁻¹	
	x	±	x	±	x	±	x	±	x	±
0 - 15	1,20		3,8		4,32	0,45	0,21	0,03	709	164
15 - 30	1,15		4,0		3,07	0,77	0,16	0,05	531	200
30 - 45	1,07		4,2		1,87	0,56	0,11	0,04	475	200

x	Potasio camb. meg.100g ⁻¹		Calcio camb. meg.100g ⁻¹		Magnesio camb. meg.100g ⁻¹	
	±	x	±	x	±	x
0,48	0,04	2,20	0,73	0,90	0,14	
0,26	0,08	2,73	0,90	0,88	0,09	
0,17	0,05	3,10	0,61	0,93	0,19	

Cuadro 4.21. Reservas de materia orgánica de café (*Coffea arabica*) asociado con laurel (*Cordia alliodora*) y poró (*Erythrina poeppigiana*) a la edad de 4,5 años en Turrialba, Costa Rica ($t \cdot ha^{-1}$; según Alpizar *et al.*, 3).

	Café con laurel		Café con poró	
Hojas	1,9	2,2	2,7	4,7
Ramas	2,2	3,2	3,8	7,7
Tallos	3,8	23,8	8,7	7,8
Raíces finas		4,5		2,6
Subtotal vegetación		41,6		38,1
Mantillo		4,9		6,3
Suelo mineral		195,8		164,4
TOTAL EN EL SISTEMA		242,3		208,8

La determinación de la biomasa, especialmente de hojas y ramas, depende de la fenología de las especies involucradas y de las condiciones climáticas reinantes.

Los datos de biomasa del poró ($12,4 t \cdot ha^{-1}$) de Alpizar *et al.* (2) se basan en la suma de dos podas al año; así, la biomasa foliar y de ramas depende, además, del intervalo entre podas y la técnica de la misma. Así, Russo y Budowski (142) encontraron en base a dos podas, una biomasa seca de hojas y ramas de poró de $11,8 ton \cdot ha^{-1}$; con una sola poda: $18,5 t \cdot ha^{-1}$. Por su parte, Glover y Beer (68) encontraron una biomasa de hojas y ramas de poró de $7,8 t \cdot ha^{-1}$ en tres podas al año.

En general, dichos estudios concuerdan en que el crecimiento del cafeto, y con ello su producción de biomasa, disminuye considerablemente cuando el porcentaje de luz que la planta recibe es menor de 30%, observándose un crecimiento normal pero no máximo en condiciones de sombra media entre 40 y 75%; el máximo crecimiento se logra con valores cercanos al 100% de luz recibida, siempre y cuando factores tales como la fertilización y el agua no sean limitantes. Sylvain (156) indica que la poda fuerte de la sombra del cafeto efectuada dos veces por año (a principios y a mediados de año) en la zona de Turrialba, permite una entrada de luz al cafetal que oscila entre 85 y 90%.

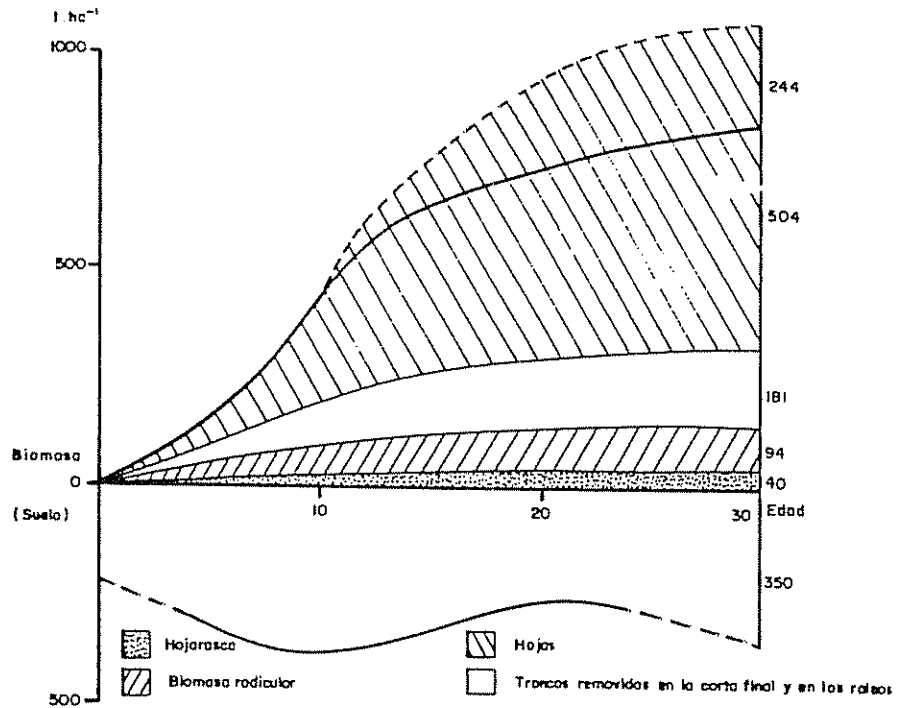


Figura 4.11. Materia orgánica en la biomasa, la hojarasca y el suelo (0-50 cm) durante una rotación de *Pinus patula* en Tanzania (según Lundgren, 117).

Analizando las condiciones de manejo de la sombra de los sistemas en discusión, se tiene que aunque la densidad del poró es grande (555 árboles por ha) en comparación con la del laurel, el hecho de existir un manejo de la sombra del poró (dos podas por año) favorece el crecimiento del cafeto. Si se considera que la sombra permanente del laurel de 278 árboles por ha podría haber producido una disminución notable de luz del cafetal. Esto, unido al efecto del "autosombreo" del cafeto, contaría como una de las causas principales de la disminución de la capacidad fotosintética del cafeto y por lo tanto, de su crecimiento. Lo anterior, ligado a otros posibles factores tales como competencia por el espacio radical, agua y nutrimentos, calidad de la luz que llega al cafeto, alelopatía, etc., serían los responsables de la disminución del crecimiento del cafeto asociado con laurel.

En cuanto a las raíces, se nota que su biomasa en el sistema con laurel es superior a la del sistema con poró. Las raíces menores de 5 mm de diámetro presentan para los dos sistemas una variabilidad mucho menor, con coeficientes de variación del 20%, en comparación con las raíces cuyo diámetro oscila entre 5 y 20 mm, con coeficientes de variación superiores a 80% (2).

Es difícil comparar los datos de la biomasa radical del presente estudio con los encontrados en la literatura, pues este parámetro parece variar mucho dependiendo de las condiciones de sombra, tipo de suelo, densidad de plantas, etc. Así se tiene que Ewell (43) obtuvo para un cafetal de Turrialba con sombra de poró un valor de $2,35 \text{ t.ha}^{-1}$ de raíces con un diámetro de hasta 20 mm y a una profundidad de 25 cm.

El valor de la biomasa seca del mantillo en el sistema con poró es superior que el valor en el sistema con laurel. Al respecto, hay que considerar que los datos corresponden a una determinada época del año y que, por lo tanto, sólo reflejan parcialmente la dinámica del mismo si se piensa que tal dinámica depende de factores tales como fenología del laurel y café, época de poda del poró, etc. Sin embargo, los datos indican en parte esta dinámica, si se tiene en cuenta que la época de medición fue a inicios de setiembre de 1981, casi mes y medio después de que se había podado el poró, el cual adicionó cantidades considerables de materia orgánica al suelo.

Por su parte, los valores del mantillo se encuentran dentro del ámbito que Suárez de Castro y Rodríguez (152) mencionan al estudiar cafetales con sombra de *Inga* spp. en Colombia. Dichos valores oscilan desde $0,86 \text{ t.ha}^{-1}$ en cafetales jóvenes hasta $23,06 \text{ t.ha}^{-1}$ en cafetales viejos.

Las reservas en el suelo mineral son por un lado superiores en el sistema con laurel en comparación con las reservas en el sistema con poró, y por otro lado éstas representan el 81% de las reservas totales del sistema con laurel y el 79% en el sistema con poró, dando así una gran estabilidad a los sistemas. Una comparación de las reservas orgánicas en el suelo sólo es factible entre los dos sistemas, debido sobre todo a la similitud en profundidades y tipos de suelo.

· Producción agrícola

La producción agrícola y/o maderable es uno de los aspectos más importantes de la interpretación de las ventajas y desventajas de los sistemas agroforestales. El café se cosechó desde 1978, registrándose por separado el producto de los 112 árboles efectivos por parcela. Los valores se expresaron en $\text{kg.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$ de café fresco y seco. Los datos de cosecha de café en asociación con laurel y poró en el Experimento Central del CATIE publicados por Heuvelodop *et al* (83) se resumen en el Cuadro 4.23.

Cuadro 4.22. Cuadro comparativo de fitomasa en diferentes sistemas agroforestales.

Autor	Lugar de estudio	Tipo de sistema	Plantas por ha.	Edad (años)	Blomasa seca total del cultivo (kg/ha)	Blomasa seca del cultivo (kg/ha)	Blomasa seca total de la sombra (kg/ha)	Blomasa seca de la sombra							
					HOJAS RAMAS TALLOS	HOJAS RAMAS TALLOS	HOJAS RAMAS TALLOS	HOJAS RAMAS TALLOS							
Aranguen, Escalante y Herrera [5]	40 Km oeste de Caracas, Venez. 1300 manm	Café + Inga spp. + Erythrina spp. + otros árboles de sombra.	5587	1931	7	7	4088,1	28288,3	7188,7	---	---	---	---		
Aranguen, Escalante y Herrera [6]	Ocumare de la Costa al norte de Venezuela, 12 manm	Cacao + Erythrina spp. + Castilja elástica + Anticarsus olivacea + otros.	568	30	30	30	17104,3	9879,1	4677,2	---	---	---	---		
Goiberg y Jiménez Avila [69]	Teoule, Veracruz, México	Café + Inga linicuili + Musa spp.	50	45	42	66	16713	2313	7560	6640	27940	430	17150	10260	
Russo y Budowski [143]	CATIE, Turrialba Costa Rica, 602 manm	Café + Erythrina roseopigilana	4300	260	2	8	---	---	---	---	---	---	---	---	
Estudio de "La Montaña" Alpizar 외인 [7]	CATIE, Turrialba Costa Rica, 602 manm	Café + Erythrina roseopigilana + Cacia alisodora	5000	555	5	5	15295	2698	3817	8780	20169	4665	7732	7762	
Faehbender 외인 [53]	Costa Rica, 610 manm	Cacao + Erythrina roseopigilana + Cacia alisodora	1111	278	5	5	6362	2827	3030	2505	21905	3273	9314	9318	
		Cacao + Cordia	1111	278	5	5	9819	2972	4043	2604	31867	3410	4746	23711	
		Pasto + Erythrina roseopigilana + Cacia alisodora	---	494	5	5	---	---	---	---	23108	4196	6882	12030	
		Pasto + Cordia alisodora	---	463	5	5	---	---	---	---	44824	5508	7904	31312	
Glover y Beer [67, 68]	La Suiza Turrialba Costa Rica, 610 manm	Café + Erythrina roseopigilana	3922	245	14	14	---	---	---	---	7785	3793	3932	---	
Glover y Beer [67, 68]	La Suiza Turrialba Costa Rica, 610 manm	Café + Erythrina roseopigilana + Cordia alisodora	3509	222 de poró + 475 de laurel	14	0-17	---	---	---	---	---	2953	1656	1602	---

1. Para el cuadro se tomó en cuenta el cultivo y la Inga linicuili, solamente.
 2. Los datos se refieren a la determinación por concepto de una poda del árbol de poró.
 3. Los datos se refieren a la suma de dos podas del árbol de poró en un año.
 4. Los datos se refieren a la suma de tres podas del árbol de poró en un año.
 5. Los datos se refieren exclusivamente a la suma de tres podas del árbol de poró en un año, el laurel no se tomó en cuenta.

Cuadro 4.23. Producción del café asociado con laurel y poró (kg.ha⁻¹.a⁻¹; según Heuvelodop *et al.*, 83; ver también en Fassbender *et al.* 53).

	Café bajo laurel	Café bajo poró
1970/80	4431	5103
1980/81	3816	11873
1981/82	2389	9776
1982/83	16736	11338
1983/84	3167	3627
TOTAL PESO FRESCO (1979-84)	30539	41717
TOTAL PESO SECO (1979-84)	9043	12897

Se nota que la producción de café bajo sombra de laurel no sólo es inferior a la de café bajo poró, sino que incluso disminuye año tras año y no es sino hasta el cuarto año de cosecha que sufre un incremento inesperado, que incluso supera mucho a la producción promedio de ese año y a la de todos los años anteriores bajo poró. Es muy probable que el aumento súbito en la producción del sistema con laurel se haya debido a una respuesta del cafeto al raleo de laurel que se realizó en junio de 1981, de 278 árboles.ha⁻¹ a 185 árboles.ha⁻¹.

A pesar de que es difícil dar una explicación integral y detallada de cómo los árboles de sombra afectan positiva o negativamente el rendimiento del cafeto, debido a lo complejo de las interacciones existentes para cada sistema, se puede, al menos, resaltar los siguientes aspectos de la sombra (aunque no son los únicos).

- La sombra permanente del laurel en comparación con la sombra regulada del poró puede disminuir la cantidad de luz disponible que llega al cafeto, siendo afectada por un lado la producción de materia seca del cafeto, sobre todo en la biomasa foliar, y por otro lado el proceso de floración, lo que como consecuencia redundaría en una menor producción de grano.
- La sombra del laurel recircula una cantidad menor de nutrimentos que la sombra de poró, afectándose así elementos tan importantes como el N y K.

- La sombra del laurel, en comparación con la del poró, puede haber provocado una utilización ineficiente de las dosis aplicadas de fertilizante, por parte del cafeto.
- Por último, no se descarta la posibilidad de una mayor competencia radical en el sistema con laurel que en el sistema asociado con poró.

Las cosechas de café procesado registradas durante dos años por Glover y Beer (67) en cultivares adultos de café (12 años) en La Suiza, Turrialba, se resumen como sigue ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$):

Café con poró	1916
Café con poró y laurel	1887

Los valores encontrados en estos experimentos en el área de Turrialba, Costa Rica, sobrepasan así los valores de otras regiones o países (28).

La diferencia básica de los sistemas agroforestales se observa cuando los árboles no sólo producen sombra para los cultivos, sino más bien cumplen la finalidad de producir madera (de construcción, exportación, leña) y/o frutas o cumplen otras funciones (cortinas rompevientos y producción de material reproductivo).

· Producción maderable

Para determinar el crecimiento de los árboles de laurel se realizaron en forma periódica mediciones del diámetro (dap, cm) y de la altura (m) de todos los árboles de las parcelas experimentales. Los resultados se presentan en la Figura 4.12. En función de ellos se puede calcular el incremento maderable de los tallos. Así a los cinco y siete años de crecimiento del laurel se encontraron los siguientes valores (Fassbender y Alpízar, 55; Heuvel dop *et al*, 83):

	dap cm	h m	Madera utilizable $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$
5 años	25,9	11,9	54,1
7 años	30,3	14,7	90,0

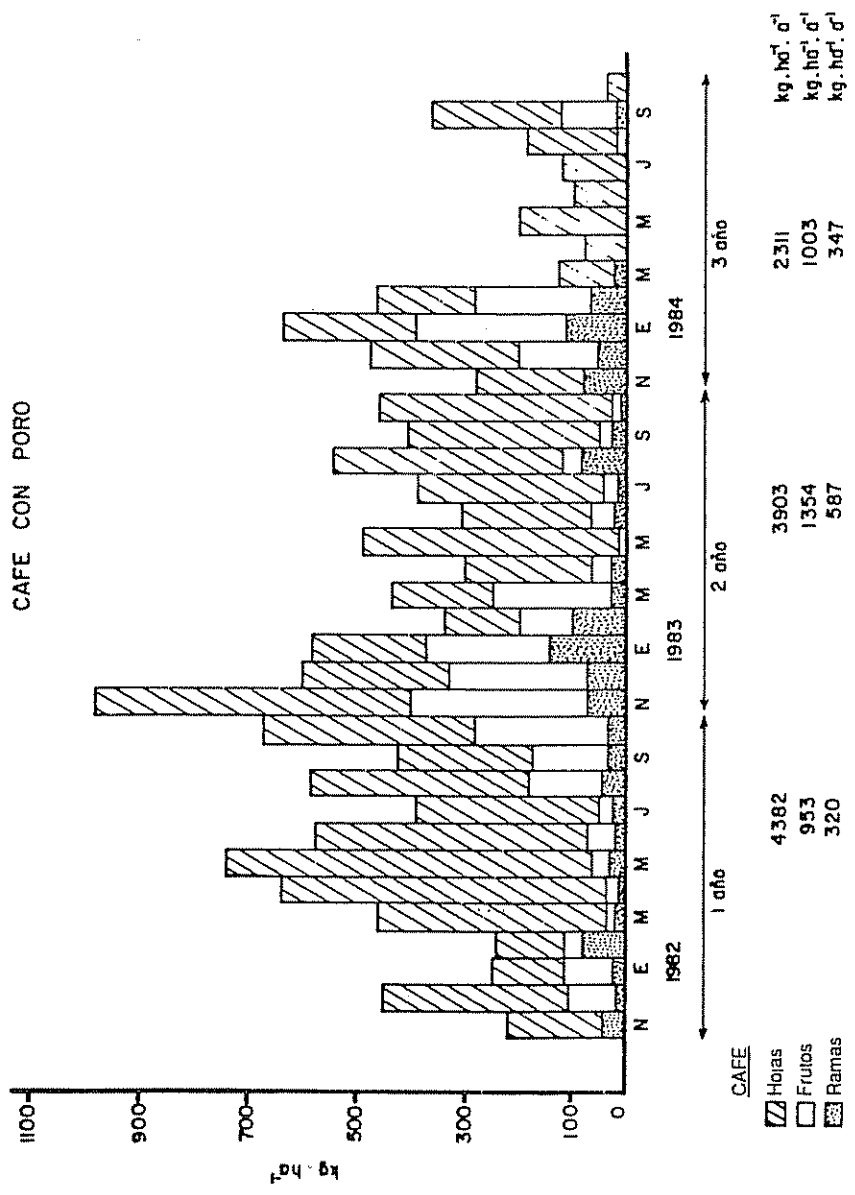


Figura 4.12. Producción de residuos vegetales de café bajo poró, datos mensuales y anuales (kg.ha⁻¹; según Heuveldop et al., 83).

Los valores de madera en pie son bastante altos en comparación con otros encontrados en la literatura (24, 93). Igualmente, los incrementos anuales son elevados en comparación con otros datos de la literatura.

· Producción y descomposición de residuos

La producción y descomposición de residuos vegetales es un eslabón que une los factores bióticos (plantas) y abióticos (capa de mantillo y suelo mineral) de los sistemas de producción agroforestales. En los procesos de humificación y mineralización se producen sustancias húmicas y elementos nutritivos que son incorporados al suelo.

Para la medición de la caída natural de residuos (hojarasca) se colocaron seis trampas colectoras por tratamiento (marco de madera de 1 m² con fondo de malla) cada siete días, separándolas en los diferentes compartimientos de hojas, ramas y frutos. Las muestras se secaron en una estufa, después se hizo el análisis químico correspondiente (N, P, K, Ca y Mg). La producción natural de residuos durante tres años (nov. 1981-oct. 1984, Heuveldop *et al.*, 83), se ha resumido en el Cuadro 4.24.

El patrón mensual de deposición de residuos depende de las características fisiológicas y fenológicas de las especies involucradas en el sistema y las condiciones climáticas reinantes. En las plantas de café, la caída de las hojas se concentra después de la floración (Figura 4.12). Las hojas del laurel caen principalmente en la época seca del año, entre enero y abril, por su carácter caducifolio. Las cantidades anuales han aumentado año con año en función del crecimiento gradual de las copas de los árboles.

La producción de hojarasca del poró es afectada notablemente por el manejo de las podas. Con el rebrote después de las podas se forman ramas y hojas que luego participan en la producción de residuos vegetales (Figura 4.13).

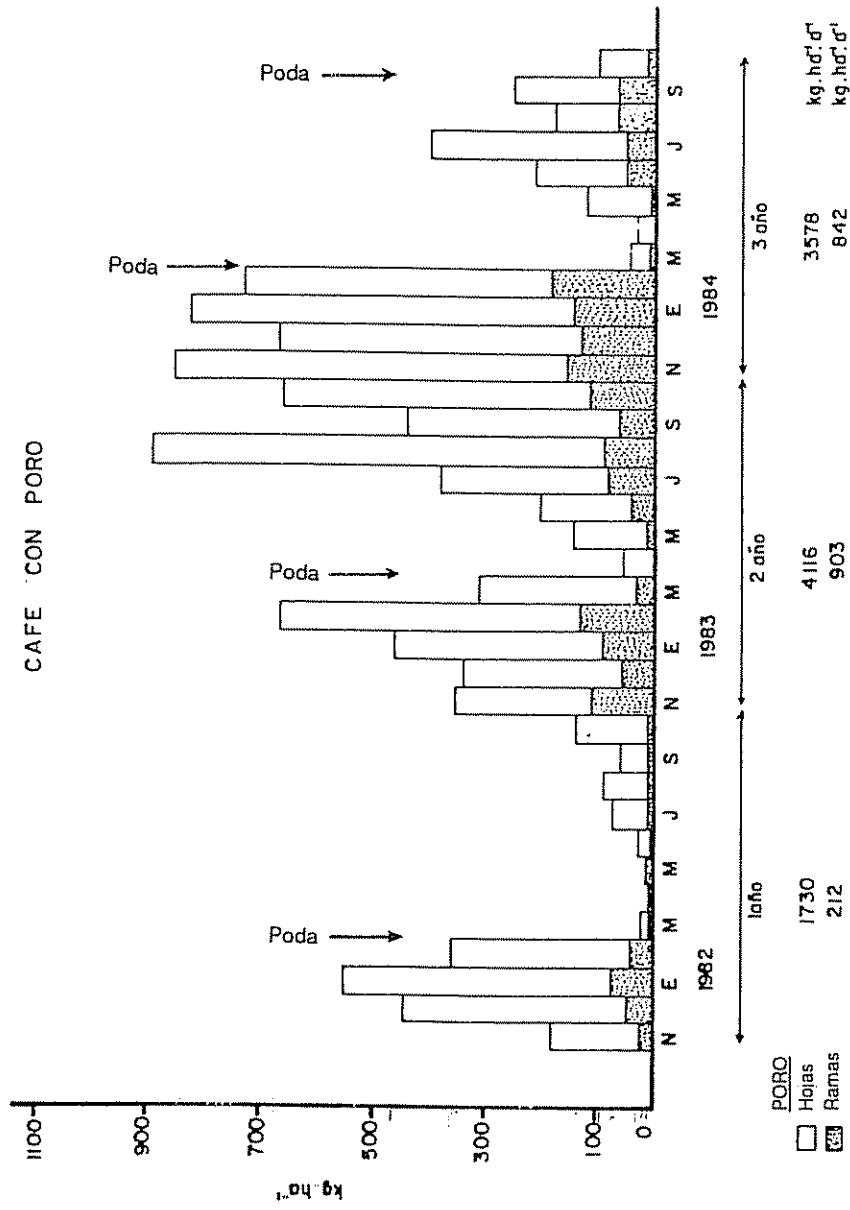


Figura 4.13. Producción natural de residuos del poró como sombra del café, datos mensuales y anuales (kg.ha⁻¹; según Heuvelidop et al., 83).

Cuadro 4.24. Producción natural de residuos vegetales de café asociado con laurel y poró (kg.ha⁻¹.a⁻¹; según Heuveldop *et al*, 83).

	CAFE			LAUREL	
	Hojas	Ramas	Frutos	Hojas	Ramas
1 año	1980	45	416	3124	138
2 año	1981	321	471	3675	1130
3 año	2364	641	683	4010	1282
Promedio	2108	336	523	3603	850
		2967		4453	
	CAFE			PORO	
	Hojas	Ramas	Frutos	Hojas	Ramas
1 año	4382	320	953	1731	212
2 año	3903	587	1354	4116	903
3 año	2311	347	1003	3578	842
Promedio	3532	418	1103	3142	652
		5053		3794	

Las podas realizadas en los sistemas agroforestales con leguminosas (*Erythrina* spp., *Inga* spp., *Gliricidia* spp., *Albizia* spp.) tienen la función de regular la sombra, activar la floración y maduración de los frutos, producir material de cobertura del suelo, liberar nitrógeno fijado en los nódulos radiculares y aumentar las reservas húmicas del suelo. Los residuos producidos por podas de poró en el Experimento Central del CATIE (Heuveldop *et al*, 83) durante un año alcanzaron 12,4 t.ha⁻¹.

Los valores de transferencia anual de materia orgánica (M.O.; t.ha⁻¹.a⁻¹) de elementos nutritivos (kg.ha⁻¹.a⁻¹) de los sistemas estudiados se han resumido en el Cuadro 4.25.

Cuadro 4.25. Producción de residuos naturales y de poda en sistemas de café con laurel y café con poró y su contenido de elementos nutritivos ($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ ó $kg \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$; según diferentes autores).

	Materia Orgánica $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$	N $kg \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$	P $kg \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$	K
Heuveloop <i>et al</i>				
Glover y Beer	20,0	461	35	259
Russo y Budowski	17,8	377	31	279
Heuveloop <i>et al</i>	4,3	228	18	139
Glover y Beer	5,7	114	8	55
Aranguren	16,1	338	33	169
Goldberg	----	170	--	---
Goldberg	7,5/8,5	---	--	---
Goldberg	9,2	---	--	---
Suárez y Rodríguez	4,7-13,1	---	--	---

Para el estudio de la velocidad de descomposición de los residuos vegetales se prepararon cajas de madera (150 x 50 cm, tamíz plástico de 1 mm), en las que se colocaron 200 g de hojas frescas (café 78/laurel 122; café 144/poró 56) de acuerdo con la tasa de producción de residuos (83). Las cajas fueron expuestas durante 1, 2, 4, 6, 8 y 12 meses, recolectadas y después de su secado se determinó el peso seco para determinar la curva y tasa de descomposición.

Según Heuveloop *et al* (83), la curva de descomposición de una mezcla de hojas de café y laurel o poró es exponencial, así, el proceso en su fase inicial es más acelerado (Figura 4.14). Aranguren *et al* (5) han indicado que los residuos foliares de sombra (*Erythrina* spp., e *Inga* spp.) de un cafetal se descomponen en un 50% en dos meses. En los pocos estudios hasta ahora realizados se encuentra así un equilibrio entre la deposición y la descomposición de residuos vegetales.

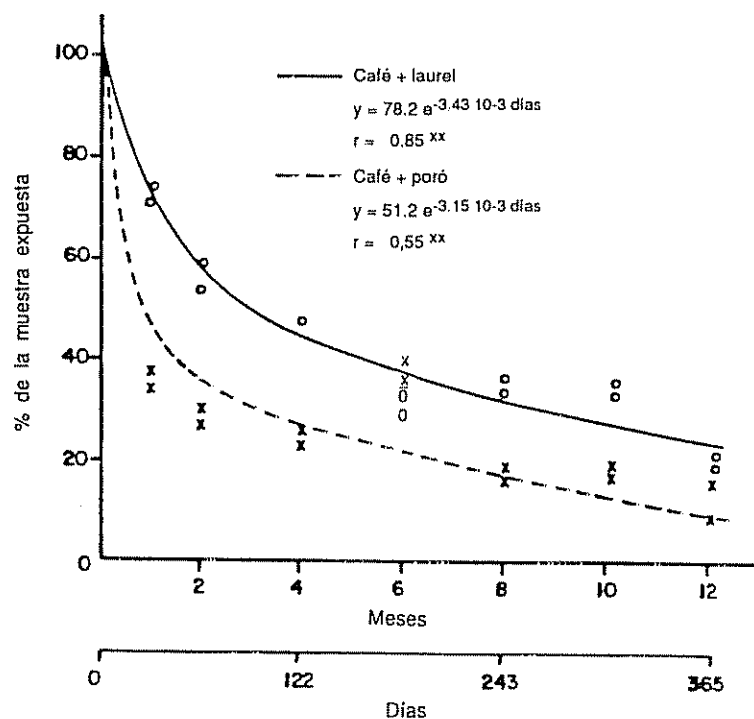


Figura 4.14. Descomposición de los residuos de café con poró y café con laurel (% remanente de la muestra; según Heuveloop *et al*, 83).

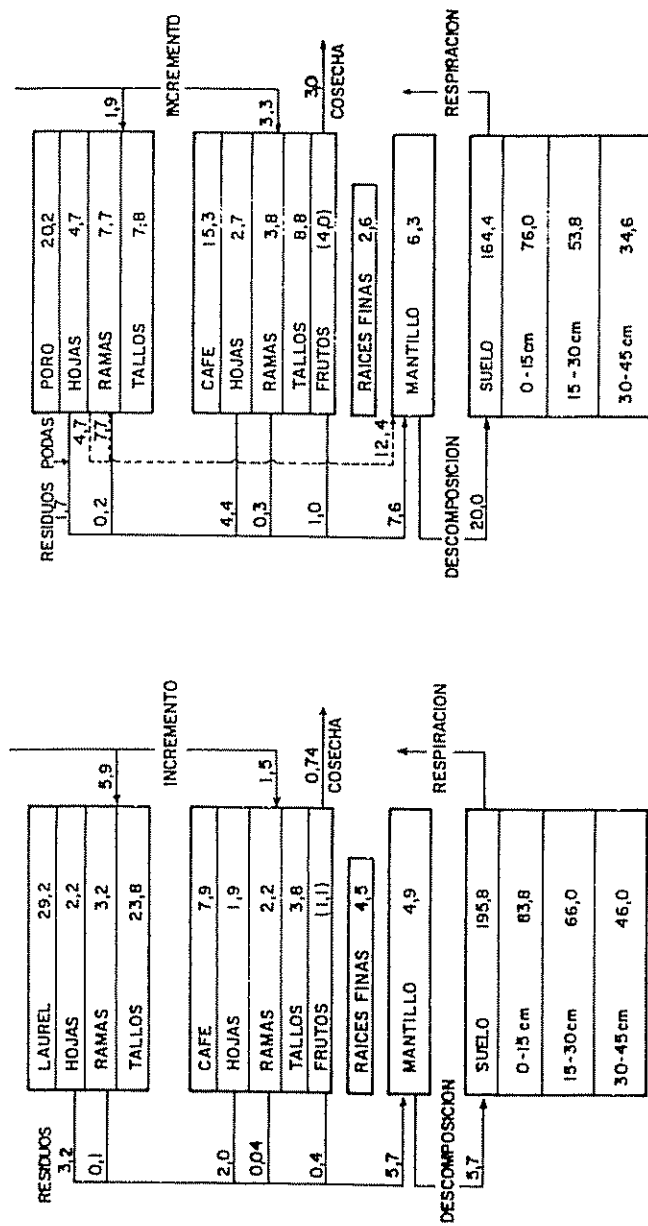


Figura 4.15. Modelo de la materia orgánica de los sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) asociado con laurel (*Cordia alliodora*) y con poró (*Erythrina poeppigiana*) (reservas t.ha⁻¹; transterencias t.ha⁻¹.a⁻¹; según Fassbender y Alpizar, 55, Fassbender et al., 53).

· Modelo del ciclo de la materia orgánica

Con base en todas las mediciones realizadas se puede preparar el modelo de la materia orgánica de los sistemas de estudio de café (Coffea arabica) con sombra de laurel (Cordia alliodora) y de poró (Erythrina poeppigiana). Para los valores utilizados para los modelos de la Figura 4.16 se trata en detalle de (53, 55):

- Biomasa de café medida a la edad de 4,5 años, biomasa del laurel determinada a los cinco años, biomasa del laurel determinada a los cinco años, biomasa del poró medida como material de dos podas (hojas y ramas) en el quinto año experimental y de la medición volumétrica del tallo. Biomasa de raíces finas de la profundidad de 0 a 45 cm sin diferenciar entre especies, medidas en el quinto año experimental.
- Materia orgánica del mantillo medida igualmente en el quinto año experimental.
- Materia orgánica del suelo determinada al inicio del experimento (1977) en las profundidades 0 - 15, 15 - 30 y 30 - 45 cm.
- Producción de residuos naturales en el quinto año experimental. Producción de residuos de podas en función de dos cortas de ramas y hojas del poró realizadas en el quinto año.
- Descomposición de residuos vegetales en la capa de mantillo asumiendo que la tasa de producción es igual que la tasa de descomposición.
- Cosecha en el quinto año experimental.
- Incremento de las reservas maderables (tallos y ramas) durante el quinto año experimental.

El modelo es una representación holística, completa del sistema y permite una serie de interpretaciones y consideraciones.

La comparación absoluta de los datos de biomasa es complicada y delicada. Se trata de datos de parcelas experimentales, homogéneas bajo condiciones bastante controladas. Se pretende representar las condiciones de los sistemas de cultivo utilizados por los agricultores de la región. Los árboles de sombra utilizados cumplen sin embargo,

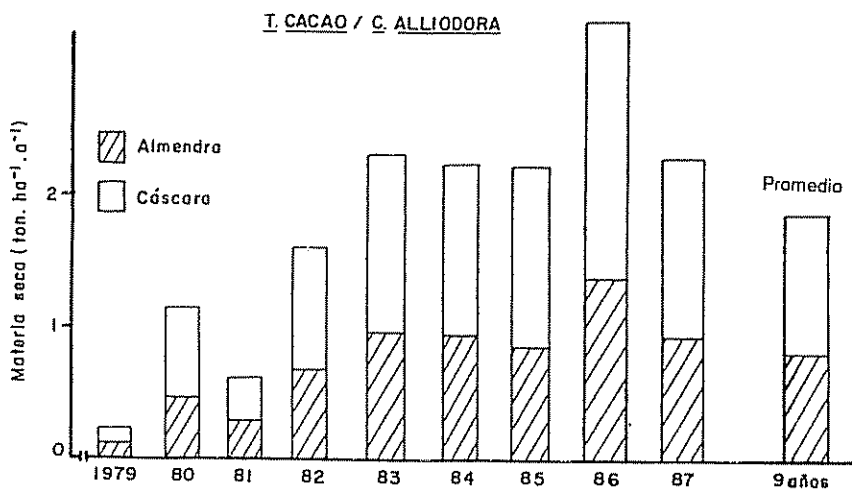
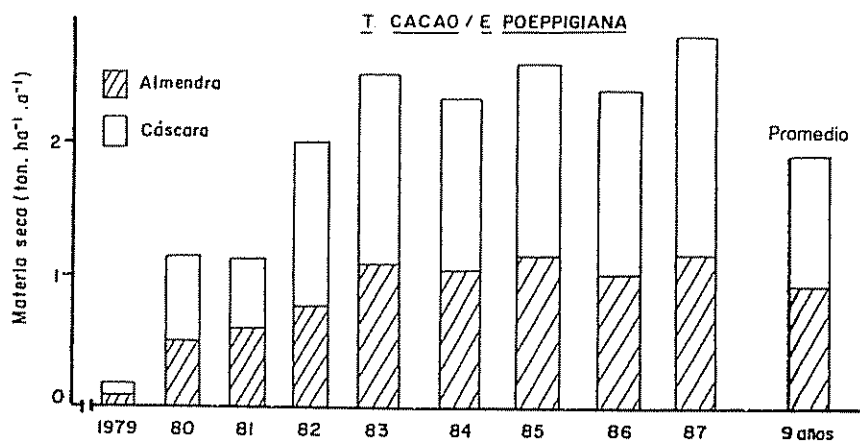


Figura 4.16. Producción de cacao bajo sombra de laurel y poró (materia seca de almendras y cáscara; $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$; basado en datos de Beer *et al.*, 12, 13; Fassbender *et al.*, 59; Heuvelodop *et al.*, 84).

funciones muy diferentes. En el caso del laurel se pretende producir madera, la cual constituye la mayor parte de la biomasa del sistema (57 %). El poró tiene otras funciones como producción de sombra, producción de residuos vegetales como material de cobertura del suelo y fijación del nitrógeno (53, 55). La comparación de los datos de biomasa con otros estudios es aún más complicado ya que se trata de otras asociaciones de café con árboles de sombra en otras zonas ecológicas y con otras condiciones de suelos, densidades, edades y variedades de café y árboles de sombra.

Las implicaciones de la sombra en la regulación de las cosechas han sido discutidas anteriormente en detalle. Las cosechas de las parcelas experimentales generalmente son más elevadas que las de las plantaciones de campesinos. Los valores de cosechas de los sistemas en estudio presentan valores muy variables entre los años, los datos de la Figura 4.15 con 3,0 y 0,74 t.M.O.ha⁻¹.a⁻¹ representan solo un año experimental (1981/82); a fines de mejor interpretación deben considerarse en forma más adecuada los valores a largo plazo (promedio de cinco años: t.ha⁻¹.a⁻¹: 1,81 café bajo laurel, 2,58 café bajo poró, 53, 55).

Las cosechas de café representan una exportación de materia del sistema. Un índice de exportación es así el porcentaje de la cosecha en el total de la biomasa. En condiciones comparables del quinto año experimental resultan los siguientes valores (53, 55, 83):

	Biomasa t.ha ⁻¹	Cosecha t.ha ⁻¹ .a ⁻¹	Índice (%)
Café con laurel	41,6	0,74	1,78
Café con poró	38,1	3,03	7,95

Considerando varios años experimentales las diferencias se reducen. No obstante, los resultados indican claramente que el sistema con poró supera al laurel. Sin embargo la producción de madera es importante. La madera en pie (90 m³.ha a los siete años) alcanza un valor aproximado de US \$1800. Una comparación económica de los sistemas solo puede realizarse al completarse el ciclo de producción (53, 55).

La producción primaria neta anual de los sistemas de producción se puede calcular como la adición de (2, 53, 55, 83):

- el incremento de las reservas maderables (tallos y ramas)
- las tasas de deposición de los residuos vegetales (hojas, ramas, tallos, frutos, incluyendo raíces)
- las cosechas anuales

En los sistemas estudiados se han obtenido los siguientes valores de producción primaria en el quinto año experimental (2, 53, 55; $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$):

Café	4,6	Laurel	8,2	Raíces	4,5	Total	17,3
Café	10,0	Poró	16,3	Raíces	2,6	Total	28,9

Los valores encontrados son bastante elevados al compararlos con los de otros agroecosistemas (Cuadro 4.13 sistemas agrícolas, Cuadro 4.16 plantaciones forestales). Para obtener resultados más representativos de la producción primaria neta se necesitan observaciones a largo plazo (desarrollo de la biomasa, cambios en la producción de residuos, aumentos de las cosechas).

La producción de residuos vegetales naturales y de podas es muy variable, especialmente para el poró en función de sus podas (Heuveldop *et al.*, 83). Los valores de la Figura 4.15 de la producción de residuos vegetales del quinto año experimental considerado para el modelo de la materia orgánica, varían notablemente en el transcurso experimental (valores de tres años en paréntesis) resumido como sigue ($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$):

	Café con laurel		Café con poró	
Residuos naturales	2,4 (3,0)	3,3 (4,4)	5,7 (5,0)	1,9 (4,0)
Residuos de podas	--	--	--	12,4
TOTAL	5,6		20,0	

En el sistema café con laurel las hojas del café contribuyen con 35% y las de laurel con 58%. En el sistema con poró el 62% corresponde a los residuos de la poda del poró y el resto proviene de la caída natural de los residuos, de los cuales 22% son hojas de café y 9% son hojas de café y poró. En general, se tiene que la relación en la producción total de materia orgánica entre los sistemas café + laurel; café + poró es del orden de 1: 3,5; a su vez la relación natural de residuos naturales con la producción de residuos de podas en el sistema con poró es de 1:1,6.

Una desventaja en el estudio es que no se conoce la dinámica de las raíces gruesas y/o finas en relación con su longevidad. Se podría suponer que las raíces finas se están renovando anualmente. Sin embargo, los valores respectivos no se han considerado en el modelo.

Una forma adecuada de expresar la recirculación de la materia orgánica es el cociente (en porcentaje) de lo que circula como residuo y la cantidad total de biomasa aérea almacenada, ya sea por el sistema o por la planta. A continuación se presentan los cocientes encontrados en el presente estudio (porcentaje).

Café 31; laurel 15; sistema 25

Café 37; poró 71; sistema 56

Los datos indican la superioridad de circulación de la materia orgánica con poró, se destaca la capacidad de circulación en el sistema con poró en comparación con el sistema con laurel. La circulación, en el caso del sistema con poró, depende no sólo de la fenología natural, sino también del manejo del poró. En el caso del sistema con laurel se depende exclusivamente de la fenología natural del cafeto y laurel.

La descomposición de los residuos vegetales es exponencial en función del tiempo (Heuvelink *et al*, 83). Para los fines del modelo de la materia orgánica se ha considerado que la tasa anual de descomposición es igual que la de deposición de residuos (Figura 4.15). Esta decisión se basa en observaciones de campo (83), que no existe una acumulación progresiva de material en la capa de mantillo sobre el suelo. Aquí es necesario nuevamente indicar que faltan conocimientos sobre la descomposición de residuos de raíces.

Respecto a las reservas orgánicas del suelo al inicio del experimento, sólo se puede afirmar que las diferencias encontradas de $164,4 \text{ t.ha}^{-1}$ en café con poró y de $195,8 \text{ t.ha}^{-1}$ en café con laurel, se deben sobre todo al manejo y formación del suelo antes del experimento

y sólo sirven como un punto de partida o de comparación conforme los sistemas se van desarrollando. El efecto de los sistemas en estudio sobre el contenido de materia orgánica en el suelo se puede analizar después de varios años, en forma ideal cuando se termine un ciclo de producción.

4.4.3. Materia orgánica en sistemas de cacao con árboles de sombra

- Inventario de las reservas de materia orgánica

Tal como se indicó anteriormente los modelos de la materia orgánica de sistemas agroforestales de cacao con árboles de sombra se basan en los resultados obtenidos en el Experimento Central del CATIE, Turrialba, Costa Rica. En las publicaciones pasadas (4, 11, 41, 57, 84), se han considerado los valores iniciales medidos cuando los sistemas fueron plantados y desarrollados hasta los primeros cinco años. Ahora se pueden presentar valores medidos en forma continua en el quinquenio de seis a 10 años de edad de los sistemas (12, 13, 58, 59, 90, 91). No hay duda que esta información es única en la literatura mundial agroforestal con base en estudios a largo plazo. En este experimento se plantaron en agosto de 1977 plantas de cacao (*Theobroma cacao*, híbrido Catongo x Pound) a una distancia de 3 x 3 m (1111 árboles por hectárea) intercalando los árboles de sombra de laurel (*Cordia alliodora*) y poró (*Erythrina poeppigiana*) a una distancia de 6 x 6 m (278 árboles por hectárea) (4, 11, 41).

Los estudios de la biomasa han sido realizados a la edad de cinco (1982; Alpízar *et al.*, 4; Fassbender *et al.*, 57) y de 10 años (1987; Beer *et al.*, 12, 13; Fassbender *et al.*, 59) de las parcelas experimentales.

Se utilizaron técnicas no destructivas para estimar la biomasa promedio por individuo, de troncos, ramas y hojas, las cuales fueron convertidas a valores por hectárea empleando la densidad de plantación de cada especie.

La determinación de biomasa de ramas y hojas del cacao se efectuó con base en una poda de ramas (diámetro basal < 5 cm) de 16 árboles de cada parcela. El procedimiento consistió en tomar todas las ramas podadas de un mismo árbol, medir el diámetro basal de cada una y luego el peso seco total, tanto de madera como de hojas, por árbol. Con los datos de diámetro basal de las ramas se calculó para cada árbol el área basal total de las ramas podadas. Con los datos de todos los árboles podados se construyeron regresiones de biomasa de ramas o de

hojas en función del área basal total de ramas podadas por árbol (ver Cannel, 27). Se procedió luego a la medición del diámetro basal y del área basal total de las ramas no podadas remanentes en cada árbol, empleándose las regresiones anteriores para estimar la biomasa de hojas o de ramas remanente en cada árbol (Cuadro 4.26). Todos los chupones fueron podados, separados en madera y hojas y su peso seco determinado. La biomasa de los troncos más las ramas de diámetro mayor a 5 cm fue determinada con base en la determinación del volumen de los mismos y a una estimación de la densidad de la madera ($0,33 \text{ g.cm}^{-1}$) a partir de muestras tomadas por barrenamiento (barreno de Pressler; diámetro 5 mm). La determinación de volumen (fórmula de Smalian) fue efectuada midiendo diámetros a intervalos de un metro o menos, dependiendo de la existencia de irregularidades en los troncos y ramas (Beer et al 12, 13).

Los datos de biomasa del poró a la edad de cinco años se basan en la medición de todos los tallos de las parcelas, su cubicación y la determinación del peso específico básico de la madera ($0,24 \text{ g.cm}^{-3}$, medido con el barreno de Pressler). La biomasa de ramas y hojas se basa en el material de podas de 32 árboles (marzo y setiembre de 1982), en las cuales se cortó todo el material existente a 2,6 m de altura. Se anotaron los pesos frescos de hojas y ramas, se secaron 16 muestras en la estufa y con el porcentaje de humedad se calcularon los pesos promedio de una poda por hectárea (Alpízar et al, 4; Fassbender et al, 57). A los diez años se usó la misma técnica considerando una poda (marzo 1987) (Beer et al, 12, 13).

La biomasa del tallo de Cordia alliodora se calculó en base a la altura y diámetro de todos los árboles de la parcela y el peso específico de la madera ($0,44 \text{ g.cm}^{-3}$). Para la determinación de la biomasa de las hojas y ramas a la edad de cinco años se tumbaron ocho árboles de experimento, se pesaron las ramas y tallos y con el porcentaje de humedad de 16 muestras se calcularon las reservas orgánicas por hectárea (Alpízar et al, 4). A la edad de 10 años se usaron las metodologías anteriormente descritas de correlaciones entre área basal y diámetro de las ramas (Beer et al, 12, 13).

Para la determinación de la biomasa de raíces finas (diámetro 20 mm) se utilizó tanto a la edad de cinco como de diez años un anillo metálico (27,4 cm de diámetro y 15 cm de altura) que se introdujo en el suelo a profundidades de 0-15, 15-30, y 30-45 cm con 16 repeticiones por tratamiento. Las raíces se separaron del suelo con agua a presión normal. Las muestras se secaron y así se calculó su peso por hectárea.

Cuadro 4.26. Modelos para la predicción de biomasa de hojas y/o madera en ramas, de Theobroma cacao o Cordia alliodora con base en el área basal o en el diámetro de las ramas (Beer et al, 12, 13).

Sistema	Especia	Comparti- miento	Modelo*	R
<u>T. cacao</u>	<u>C. alliodora</u>	Materia		
<u>C. alliodora</u>		Leñosa	$\ln Z = 3,03 + (2,69 \times \ln D)$	0,89
<u>T. cacao</u> <u>E. poeppigiana</u>	<u>T. cacao</u>	Hojas	$Y = -0,0190^{**} + (0,0349 \times BA)$	0,90
<u>T. cacao</u> <u>E. poeppigiana</u>	<u>T. cacao</u>	Materia		
		Leñosa	$Y = -0,0376^{**} + (0,133 \times BA)$	0,92
<u>T. cacao</u> <u>C. alliodora</u>	<u>T. cacao</u>	Hojas	$Y = -0,0393^{**} + (0,066 \times BA)$	0,95
<u>T. cacao</u> <u>C. alliodora</u>	<u>T. cacao</u>	Materia		
		Leñosa	$\ln Y = -3,65 + (1,17 \times \ln BA)$	0,96

* Z = Biomasa de una rama (≤ 10 cm D)

Y = Biomasa por árbol; (Total de ramas podadas ≤ 5 cm D)

D = Diámetro basal de una rama

BA = Suma del área basal de todas las ramas podadas por árbol

** = Coeficiente sin significancia estadística

La materia orgánica de la capa de mantillo se determinó en 1982 y 1987 (cinco y diez años de edad de los sistemas) utilizando un marco de madera de $0,25 \text{ m}^{-2}$ con 16 repeticiones por tratamiento. Las muestras de material en descomposición se secaron y pesaron para calcular su peso por hectárea.

Se tomaron muestras del suelo mineral al inicio del experimento (1977), a cinco años (1982) y nueve años (1986) con cinco barrenamientos por parcela a profundidades de 0-15, 15-30, y 30-45 cm y se analizaron en su contenido de humus. La densidad aparente se determinó para las profundidades arriba indicadas con anillos volumétricos, (250 cm^{-3}) con ocho repeticiones por profundidad. En función de estos datos se calculó la materia orgánica por hectárea.

Los valores obtenidos en las determinaciones realizadas se han resumido en el Cuadro 4.27. El laurel presenta a la edad de cinco años una biomasa seca total de $31,9 \text{ t.ha}^{-1}$ de la cual el 74% son tallos, el 15% ramas y 11% hojas. El poró presenta una biomasa seca total de $21,90 \text{ t.ha}^{-1}$ de la cual el 42,5% son tallos, otro 42,4% ramas y 15% hojas. Por su parte el cacao con sombra de laurel presenta una biomasa seca total de $9,8 \text{ t.ha}^{-1}$, de la cual el 29% son tallos, el 41% ramas y el 30% hojas. El cacao bajo sombra de poró tiene una biomasa seca total de las reservas presentes en raíces finas y mantillo para el sistema con laurel ascienden respectivamente a $4,2$ y $4,4 \text{ t.ha}^{-1}$, y para el sistema con poró corresponden en el mismo orden a $1,8$ y 71 t.ha^{-1} . Las reservas orgánicas existentes en la biomasa área incluyendo raíces son superiores en el sistema con laurel $45,9 \text{ t.ha}^{-1}$ en el sistema con poró $32,05 \text{ t.ha}^{-1}$. Los coeficientes de variación obtenidos para los diferentes compartimentos, incluido el suelo, oscilan en promedio entre el 6 y 40% y se consideran normales en determinaciones de esta clase.

La evaluación de la metodología de la determinación de la biomasa de los sistemas en estudio basándose en correlaciones de predicción a los 10 años puede observarse en el Cuadro 4.26.

Con excepción del modelo para la predicción de biomasa de hojas de Cordia alliodora ($R^2 = 0,1$) fue posible obtener estimaciones confiables para la biomasa de hojas y ramas de cacao y Cordia (Cuadro 4.26; $R^2 = 0,8$). Uno de los compartimentos que presentó mayor incremento en el segundo quinquenio fue el de los troncos de los árboles de sombra sin mostrar una diferencia significativa entre especies (Cuadro 4.27), lo cual resulta llamativo en el caso del poró si se considera que la misma es sometida a podas intensas todos los años. Al final del segundo quinquenio la distribución de biomasa en ambos casos fue similar. En efecto, tanto al quinto como al décimo año el 80% de la biomasa del laurel estaba en el tronco, mientras que en el poró este valor era de 42% al quinto año y 80% al año décimo. Esta acumulación de biomasa en un órgano de valor económico nulo como lo es el tronco del poró, podría llevar al planteo de la necesidad de reemplazar frecuentemente a este árbol a fin de acelerar la circulación de nutrientes. Sin embargo, los costos asociados a este trabajo, y la necesidad permanente de sombra por parte del cacao, hacen poco recomendable esta práctica.

Cuadro 4.27. Reservas de biomasa en los sistemas agroforestales de cacao (Theobroma cacao) con laurel (Cordia alliodora) o poró (Erythrina poeppigiana) a las edades de cinco y diez años (t.ha) (Alpizar et al, 4; Beer et al, 12, 13; Fassbender et al, 59).

	C. alliodora -				E. poeppigiana -			
	1982		1987		1982		1987	
	5 años	10 años	5 años	10 años	5 años	10 años	5 años	10 años
Arbol de sombra	31,9	49,7	21,9	37,9	3,3	2,0	9,3	5,4
Hojas	3,4	1,0	3,3	2,0	9,3	5,4	30,5	30,5
Ramas	4,8	8,4	9,3	30,5	8,3	27,2	2,8	3,5
Tallos	23,7	40,3	3,0	3,5	3,0	16,9	2,5	6,8
Cacao	9,8	35,9	4,2	9,8	1,8	5,7	7,1	16,5
Hojas	3,0	3,7	4,4	15,2	39,1	87,3		
Ramas	4,0	24,0						
Tallos	2,8	8,2						
Raíces	4,2	9,8						
Mantillo	4,4	15,2						
Total biomasa	50,3	110,6						

Estudiando la evolución de la biomasa foliar, puede observarse que en el laurel ésta es menor a la edad de cinco años que a la de 10 años (Cuadro 4.27). Esta diferencia se debe a que los inventarios de 1982 y 1987 no fueron efectuados en el mismo mes, habiendo sido la medición de 1987 afectada por la decidua estacional de esta especie, que se da entre marzo y mayo. La diferencia del valor de la capa de mantillo depositada en el suelo también se atribuye parcialmente a esta causa. Las reducciones en la biomasa de hojas y ramas del poró registradas en el segundo quinquenio se atribuyen a la diferencia en la intensidad de las podas anteriores a cada medición.

El otro compartimento de mayor crecimiento en el segundo quinquenio del ensayo fue el de biomasa de las ramas del cacao (Cuadro 4.27). Asimismo el aumento en biomasa total de T. cacao durante este período fue mayor que el aumento en biomasa de los árboles de sombra. El aumento en biomasa del cacao bajo el poró fue menor que el aumento bajo laurel (18,9 y 26,1 t.ha⁻¹.a⁻¹, respectivamente) y por lo tanto en el año 10 la biomasa total del cacao en la asociación con el poró es menor que en combinación con el laurel.

La diferencia en el aumento en biomasa foliar del cacao (25%) comparado con el aumento de biomasa de ramas del cacao (500%), entre el quinto y el décimo año, puede en parte atribuirse a las podas del cultivo, a la diferente metodología de estimación de hojas (en 1982 se empleó un sistema de conteo de hojas de la copa) y a diferencias fenológicas debidas a la distinta época de realización del inventario. Sin embargo, aún tomando en cuenta estas diferencias, este resultado indica que la biomasa foliar del cacao ya está estabilizada. También es interesante señalar que las distintas especies arbóreas asociadas no han influenciado significativamente a la biomasa foliar del cacao.

La biomasa total del sistema (incluyendo raíces y mantillo) se incrementó en forma similar en ambos sistemas entre el quinto y el décimo año (120 %), y por lo tanto el sistema con laurel tuvo un 25% más de biomasa tanto en el año cinco como en el año 10 (Cuadro 4.28). Debido al crecimiento rápido de ramas y tallos del cacao, las diferencias en la distribución de biomasa (porcentaje) entre ambos sistemas en el quinto año se atenuaron considerablemente al alcanzar el décimo año (Cuadro 4.28).

Una comparación directa de las biomásas secas del cacao del presente estudio con otros datos de la literatura es bastante difícil, debido sobre todo a la existencia de pocos estudios en este sentido y a que los datos reportados provienen de plantaciones cuyas condiciones

Cuadro 4.28. Distribución de biomasa en los sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*)- laurel (*Cordia alliodora*) y cacao con poró- (*E. poeppigiana*) (% de totales respectivos) (Beer *et al.*, 12, 13)

	cacao	/.	laurel	Raíces	Mantillo
Edad 5 (1982)	20		63	8	9
Edad 10 (1987)	32		45	9	14

	cacao	/.	laurel	Raíces	Mantillo
Edad 5 (1982)	21		56	5	18
Edad 10 (1987)	31		43	7	19

de clima, suelo, manejo cultural, edad, densidad la sombra y del cultivo son bastante variables. Así por ejemplo Boyer (17) informa de un estudio hecho en Camerún con plantaciones de 30 años con una densidad promedio $1000 \text{ cacaos.ha}^{-1}$, una biomasa seca total en tallos y ramas de 10 t.ha^{-1} bajo condiciones de sombra moderada y de 15 t.ha^{-1} sin sombra. Aranguren, Escalante y Herrera (5) informan de Venezuela en plantaciones de 30 años con una densidad de $977 \text{ cacaos.ha}^{-1}$ y con sombra densa de $566 \text{ árboles.ha}^{-1}$ cuyos componentes principales eran *Erythrina* spp., *Castilloa elástica* y *Artocarpus elástica*, una biomasa seca total acumulada en hojas, tallos y ramas de 17.1 t.ha^{-1} . Por su lado Thong y Ng (160) trabajando en Malaya con cacao de diferentes edades y bajo diferentes condiciones de sombra, indican un valor promedio de reservas acumuladas en hojas, tallos y ramas a la edad de cinco años de $36,1 \text{ kg}$ por árbol de cacao con 30% de árboles de sombra; este valor supera en cerca de 4,5 veces el valor observado para el cacao bajo laurel que es de $8,8 \text{ kg}$ por árbol y de $7,53 \text{ kg}$ por árbol bajo poró, en este estudio.

- **Materia orgánica del suelo**

Los resultados obtenidos sobre la materia orgánica en el suelo (0-45 m) en los 10 años experimentales se observan en el Cuadro 4.28. Se nota una tendencia en ambos sistemas a la acumulación de materia orgánica a medida que transcurre el tiempo. Los valores más altos corresponden al sistema con poró. Sin embargo las diferencias detectadas entre años no son estadísticamente significativas, posiblemente debido a que el nivel de materia orgánica en el suelo (> 4%) era elevado al iniciarse el experimento.

El contenido de materia orgánica del suelo es más alto en el décimo año en el sistema cacao con poró, lo que puede ser consecuencia de los mayores aportes de hojarasca al suelo, pero también debido a diferencias entre sistemas en cuanto a las tasas de descomposición y mineralización de materia orgánica. De todas formas, las evidencias acumuladas hasta ahora permiten afirmar que ambos sistemas son capaces de mantener los niveles de materia orgánica en el suelo en condiciones permanentes de cultivo.

- **Materia orgánica total del sistema**

La materia orgánica total (biomasa total más materia orgánica del suelo) aumentó entre 125 y 130 t.ha⁻¹ en los primeros diez años, conservándose la diferencia inicial de 30 t.ha⁻¹ en favor de las parcelas de cacao con poró. Sin embargo es necesario consignar que mientras que en la asociación con laurel la materia orgánica tiende a concentrarse en el suelo (aumento de 56 t.ha⁻¹), en el sistema con laurel lo hace en la biomasa aérea. Eso significa que los beneficios de los sistemas agroforestales relacionados con la fertilidad de suelos sean posiblemente mayores en las asociaciones con poró, ratificando las hipotéticas ventajas del uso de poró en asociación con café o cacao sugeridas por Beer (10).

- **Producción de cacao**

El cacao se cosechó desde 1979, registrándose por separado los pesos de la cáscara y de las semillas de cada uno de los árboles. Durante un año se determinó semanalmente el contenido de la humedad de submuestras de semillas y cáscaras para así poder calcular la producción de materia seca.

Cuadro 4.29. Contenido de materia orgánica en el suelo y reservas de materia orgánica en los sistemas agroforestales Theobroma cacao - Cordia alliodora y I. cacao-Erythrina poeppigiana (según Beer et al. 12, 13).

CONTENIDO	<u>C. alliodora</u> <u>I. cacao</u>			<u>E. poeppigiana</u> <u>I. cacao</u>		
	1977 (inicial)	1981 (5 años)	1986 (9 años)	1977 (inicial)	1981 (5 años)	1986 (9 años)
Suelo	4,76	4,86	5,50	4,36	4,65	4,68
(porcentaje)	3,87	4,51	4,23	3,20	3,72	3,45
	2,23	3,13	3,40	2,17	2,49	2,52
RESERVAS		(t.ha ⁻¹)	(%)*	(t.ha ⁻¹)	(%)*	(%)*
Suelo	1977	168	100	198	100	100
(0 - 45 cm)	1982	188	112	229	116	116
	1986	184	109	240	121	121
Total	1977	168	100	198	100	100
del Sistema	1982	239	142	268	135	135
(suelo + biomasa)	1987	294	175	327	165	165

Los datos de producción del cacao durante nueve años experimentales (1978-1987) se pueden observar en detalle en la Figura 4.16. Los contenidos de humedad y las cosechas promedio anuales se pueden resumir como sigue (ver también Figura 4.16):

	Almendras		Cáscaras	
	Laurel / Poró	Laurel / Poró	Laurel / Poró	Laurel / Poró
Humedad %	42,7	41,9	15,3	14,8
Cosecha (kg.ha ⁻¹ .a ⁻¹)				
1978-82	306	377	420	506
1983-87	1036	1057	1489	1488

En la Figura 4.16 se observa que la cosecha ha aumentado año con año, estabilizándose en su máximo en 1983-1985. aparentemente a la edad de ocho años el cultivar ha llegado a su madurez (42). En los últimos tres años de cosechas la producción tanto de cáscaras como de semillas es ligeramente más alta bajo la sombra de poró que con la de laurel; los valores de almendras de 1036 y 1057 kg.ha⁻¹.a⁻¹ (quinquenio 1983-1987) son sin embargo estadísticamente comparables.

• Producción maderable

Los detalles de la medición de los árboles de laurel utilizados como sombra para el cacao se presentan en el Cuadro 4.30 y Figura 4.17.

En los últimos cinco años el incremento en volumen de los troncos de laurel (*C. alliodora*) promedió 9 m³.ha⁻¹.a⁻¹, lo cual fue asociado con una reducción de las tasas de crecimiento diamétrico (Cuadro 4.30). De acuerdo con los estudios de Somarriba y Beer (150), el diámetro promedio es típico para laurel (*C. alliodora*) de 10 años de edad, aunque la altura es 3,5 m menor de lo esperado. Si se considera que el experimento es fertilizado anualmente (87 kg N; 34 kg P y 32 kg.ha⁻¹.a⁻¹), las tasas de crecimiento son menores que lo esperable.

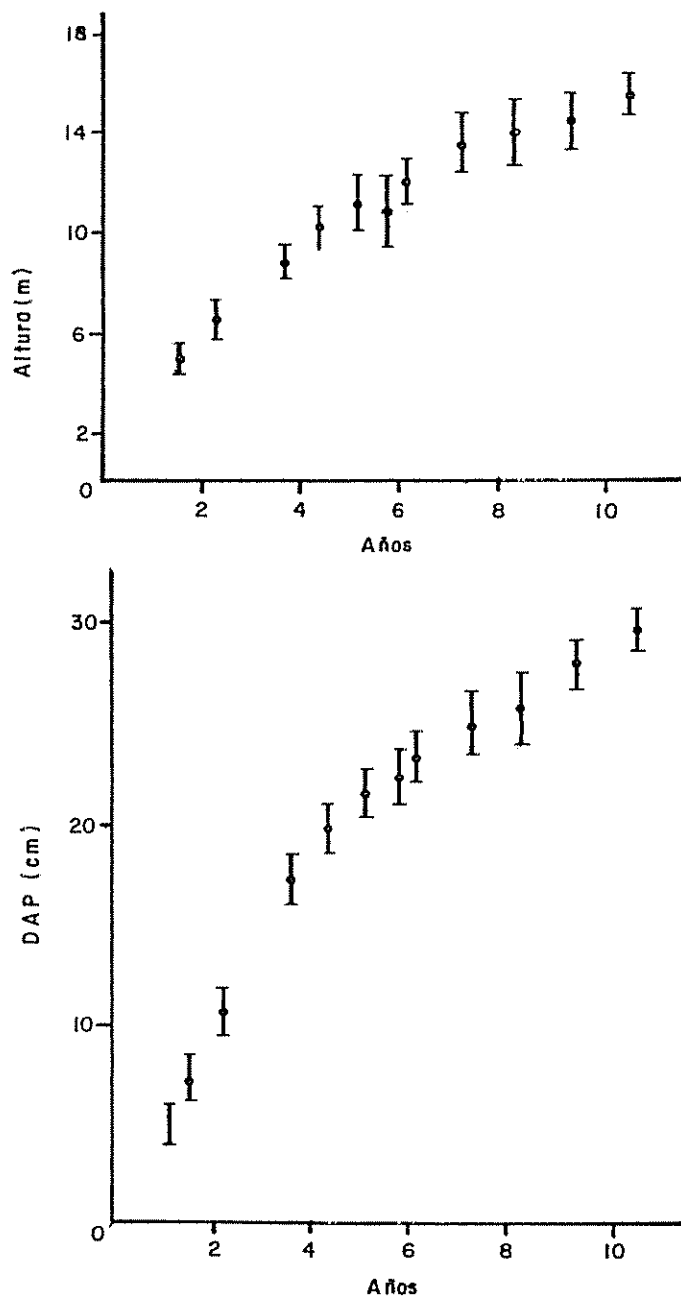


Figura 4.17. Crecimiento (altura y DAP) de *Cordia alliodora* como sombra de *Theobroma cacao* (preparado por el autor, aún no publicado).

Cuadro 4.30. Crecimiento de laurel (*Cordia alliodora*) asociado con cacao (*Theobroma cacao*) (según Beer *et al.*, 12, 13).

Edad (Años)	Diámetro tallo (cm)	Altura tallo (m)	Volumen tallo (m ³ .ha ⁻¹)*
1,2	4,1	-	-
1,5	5,8	5,0	-
2,2	8,7	6,3	-
3,7	14,0	8,7	-
4,5	16,1	10,1	22,5
5,3	17,8	10,6	31,6
5,8	17,7	10,9	31,6
6,3	18,7	11,5	38,9
7,3	20,1	12,6	47,0
8,3	21,7	13,7	60,9
9,3	22,8	13,7	66,0
10,5	24,1	15,0	77,6

* Estimados con cuadro de volumen para laurel (*C. alliodora*) (Somarriba y Beer, 150).

· Producción y descomposición de residuos

Sobre la producción de residuos naturales de cacao, laurel y cacao con poró se tienen datos de cinco años experimentales (nov. 1982, oct. 1987) (Imbach *et al.*, 91). Para su medición se colocaron trampas colectoras por tratamiento (marco de madera de 1 m² con fondo de malla fina de fibra de vidrio) a 10 cm del suelo (12, 13, 84, 91). Las muestras se colectaron cada siete días separándolas en los diferentes compartimentos de hojas, ramas y pecíolos del poró. Las muestras se secaron en una estufa, después se hizo el análisis químico correspondiente (N, P, K, Ca y Mg).

Los resultados obtenidos en los cinco años de análisis de la producción de residuos han sido resumidos en el Cuadro 4.31. Bajo las condiciones de sombra de poró (*E. poeppigiana*) se logran 9,29 t.ha⁻¹.a⁻¹, sumando así una mayor deposición de residuos (1,18 t.ha⁻¹.a⁻¹) que bajo condiciones de sombra de *C. alliodora* (8,11 t.ha⁻¹.a⁻¹).

Cuadro 4.31. Residuos naturales y residuos de podas en los sistemas agroforestales de Theobroma cacao-Cordia alliodora o I. cacao-Erythrina poeppigiana (materia seca, t.ha⁻¹.a⁻¹); período 1983-87)* (Imbach et al. 91).

Edad del sistema (años)	I. cacao/C. alliodora			I. cacao/E. poeppigiana		
	Hojas	Hojas	Ramas	Hojas	Hojas	Ramas
6	2,96	2,26	0,34	3,16	4,83	0,71
7	4,31	2,43	0,37	3,73	5,36	0,72
8	5,46	3,03	0,70	4,78	4,77	0,88
9	4,35	3,95	1,04	4,13	4,98	0,75
10	4,94	2,71	1,72	3,83	3,08	0,66
PROMEDIO	4,40	2,88	0,83	3,93	4,62	0,74
por especie	4,40			3,93		5,37
por sistema		8,11	3,71		9,29	
RESIDUOS DE PODAS**						
por especie	3,29		---	3,80		9,77
por sistema		3,29			13,57	
TOTAL		11,40			22,86	

* Período noviembre 1982-octubre 1987.

** Residuos de podas: producción anual calculado en base del total entre marzo 1985-mayo 1987 para I. cacao y junio 1985-noviembre 1987 para E. poeppigiana.

Tanto del Cuadro 4.31 así como de la Figura 4.18 se desprende que la producción de residuos, analizada desde que los sistemas en estudio tienen seis años de edad, ha aumentado gradualmente para estabilizarse a los siete años de edad. En años posteriores la variación en la producción de residuos es oscilante, no observándose una tendencia definida de aumento o disminución. Sin embargo es necesario indicar que para obtener valores promedios representativos es conveniente tener un período de observaciones adecuado. De acuerdo a los estudios sobre la producción de residuos naturales en ecosistemas naturales tropicales deben tener un mínimo de mediciones de tres a cinco años. (Proctor,136).

La participación del cacao en la producción de residuos es más o menos comparable entre los sistemas (4,40 t.ha⁻¹.a⁻¹ bajo laurel, 3,93 bajo poró). La producción de hojarasca del cacao proviene exclusivamente de las hojas.

Los árboles de sombra contribuyen notoriamente en la producción de residuos. Los valores respectivos son de 3,71 t.ha⁻¹.a⁻¹ para laurel y 5,36 t.ha⁻¹.a⁻¹ para poró. Las ramas de laurel representan 13,1 % del total de la especie; cada año ha aumentado su participación, alcanzando a la edad de 10 años 38,8 % de los residuos (Figura 4.18). En el caso del poró los residuos vegetales producidos la contribución de ramas ha aumentado también con los años (seis años de edad = 12,6 %; 17,6 % en 10 años) (Figura 4.18).

La distribución porcentual de las especies en su aporte para la producción de residuos caducifolios durante los cinco años es la siguiente:

Cacao 54,2; laurel 45,8

Cacao 42,3; poró 57,7

Los valores mensuales de la producción de residuos reflejan las características de caducifolia de las especies involucradas y las condiciones de lluvia en el ensayo experimental. El cacao produce la mayor cantidad de hojarasca en el mes de marzo. Aparentemente ello es la reacción fisiológica de esta especie después de los meses de sequía de enero y febrero.

El laurel (*C. alliodora*) presenta una caducifolia total en los meses de marzo a junio, así resultan valores más altos de producción de residuos en esos meses.

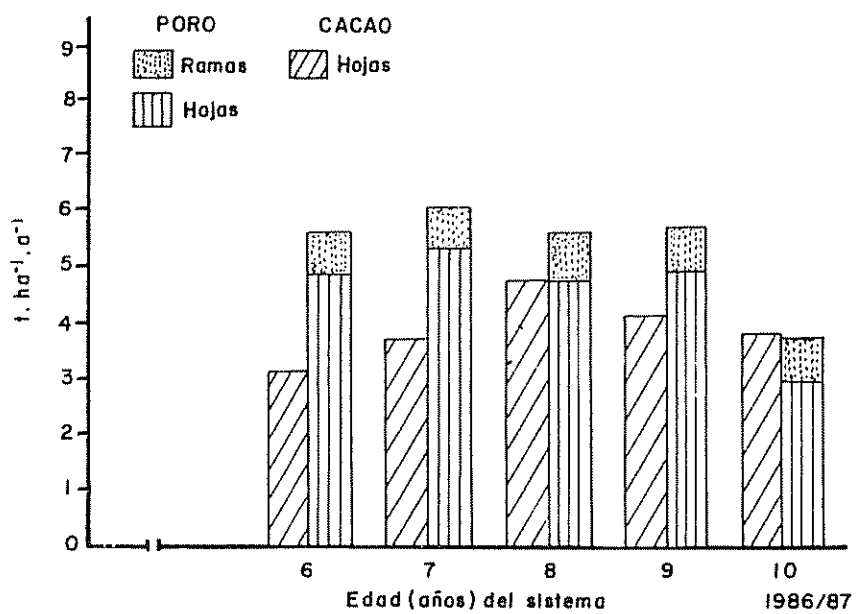
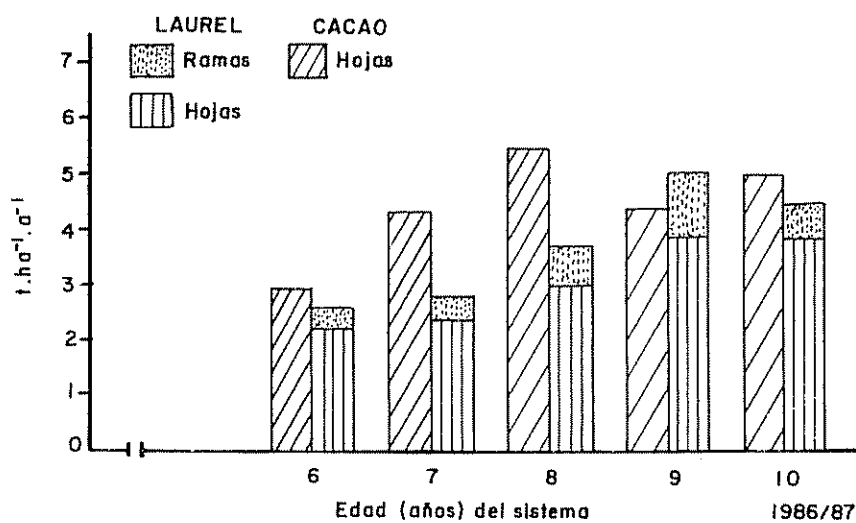


Figura 4.18. Producción de residuos naturales de los sistemas *T.cacao/C. alliodora* y *T.cacao/E.poepigiana* (materia seca t.ha⁻¹.a⁻¹; Imbach et al, 91).

En los sistemas agroforestales en estudio las podas de manejo (regulación de la luz, poda del poró) y de forma (poda del cacao) también son fuentes de residuos vegetales que se depositan en el suelo. En los sistemas estudiados, el cacao es sometido a podas ligeras una o dos veces por año, mientras que el poró se poda en un 50% cada año o dos años, según su crecimiento. Se midieron los residuos de las podas de ocho árboles de *E. poeppigiana* por parcela, clasificándolos en hojas y ramas y pesándolos en fresco para luego calcular los pesos secos, con base en muestras de 500 g por árbol, durante dos años (1985-1987, Beer *et al.*, 12, 13; Fassbender *et al.*, 59).

La caída natural de hojarasca del cacao no cambia entre asociaciones (Cuadro 4.31) y equivale al 50% de la hojarasca natural depositada en cada sistema. Las podas del cacao significan un aporte adicional de 3-4 t.ha⁻¹.a⁻¹ de hojas y ramas. Las podas regulares del poró incrementan el aporte de hojarasca al suelo en este sistema en 9,8 t.ha⁻¹.a⁻¹ de hojas y ramas. Este régimen de podas está destinado principalmente a regular la intensidad de la sombra pero obviamente es muy importante para proveer de material orgánico al suelo. Considerando todas las fuentes, el aporte de hojarasca a la capa de mantillo es el doble en la asociación cacao/poró.

Con un valor de 22,9 t.ha⁻¹.a⁻¹, el aporte en este sistema es el doble de lo encontrado como deposición de hojarasca natural en bosques tropicales (Jordan, 100, 101; Proctor, 136).

Valores comparativos sobre la producción de residuos de sistemas de cacao con árboles de sombra son muy escasos en la literatura. En los sistemas descritos por Aranguren *et al.* (6) en Venezuela se logró una deposición de 20,9 t.ha⁻¹.a⁻¹, de los cuales 10,45 t.ha⁻¹.a⁻¹ (50 %) provienen de los árboles de sombra. Boyer (17) por su parte encontró para cacaotales en Camerún una producción de 8,4 t.ha⁻¹.a⁻¹. En las condiciones de Bahía, Brasil, Santana y Cabala (147, 148) han medido la producción de residuos de cacao bajo sombra de *Erythrina fusca* durante dos años sucesivos alcanzando 8,15 y 5,99 t.ha⁻¹.a⁻¹. Los resultados son así muy heterogéneos, ello es explicable por las características intrínsecas de los lugares experimentales (suelo, temperatura, lluvia) y de los sistemas (densidad y edad de los cacaotales) y divergencias entre los árboles de sombra.

La descomposición de residuos vegetales se puede determinar exponiendo bolsas o cajas de madera conteniendo residuos y con su muestreo periódico se determina el peso perdido. Con el análisis químico de las muestras se determinan las tasas de mineralización correspondientes.

Para este estudio en el Experimento Central del CATIE se prepararon mezclas de hojas de sistemas de cacao con laurel (100:100 g) y de cacao con poró (120:80 g) en cajas de madera de 50 x 50 cm con tamíz de 1 mm, las cuales fueron expuestas 1, 2, 4, 6, 8, 10 y 12 meses. Los resultados indican que la descomposición de residuos es exponencial, así la tasa de descomposición es más acelerada en su fase inicial, sin embargo después de un año de descomposición los restos remanentes, no descompuestos representan entre 40 y 50 % del material originalmente expuesto (Heuveldop *et al*, 84).

De acuerdo con Santana y Cabala (147) la descomposición es una función logarítmica del tiempo de exposición tanto para los residuos de cacao como de *Erythrina*. Ellos encontraron las siguientes funciones de descomposición; utilizando bolsas de malla (tamíz) grande:

	Cacao	Erythrina
Hojas	$Y = 98,40 - 22,15 \ln T$	$Y = 98,24 - 26,79 \ln T$
Ramas	$Y = 100,75 - 23,03 \ln T$	$Y = 95,22 - 22,15 \ln T$
Cáscaras	$Y = 96,03 - 22,80 \ln T$	

Según Aranguren *et al* (6), la descomposición de hojas de cacao es más rápida que la de hojas de árboles leguminosos de sombra, así a los cuatro meses desaparecen los restos de hojas de cacao mientras que las de árboles de sombra necesitan nueve meses.

Los resultados descritos son difíciles de generalizar; en el caso de los estudios en Turrialba, seguramente con el tamíz de 1 mm se dificulta la entrada y salida de la microfauna descomponedora. En el caso de los estudios de Aranguren *et al* (6) y de Santana y Cabala (147, 148) la temperatura más elevada (27°C en comparación con 21°C en el estudio en Costa Rica) favorece el proceso de descomposición.

Productividad primaria neta

El cálculo de la productividad primaria neta entre las edades cero y cinco años y entre seis y 10 años se realizó mediante la adición de los promedios anuales de las siguientes variables (Beer *et al*, 12, 13).

- incrementos de biomasa aérea y de raíces, derivados de la diferencia entre los inventarios de 1977 (sólo suelo), 1982 y 1987.

- regeneración anual de raíces. Para esta variable se asumió el valor de biomasa de raíces de diámetro menor a 5 cm de los inventarios de 1982 o de 1987.
- producción del cacao (semillas y cáscaras) para los períodos 1977-1982 o 1983-1987.
- deposición natural de hojarasca y podas, medidas durante el período 1982-1987. Para el período 1977-1981 se asumió un incremento anual sigmoïdal en la producción de hojarasca, con baja producción en los dos primeros años y que sube rápidamente en el tercer y cuarto año. Por lo tanto, la producción total de hojarasca entre 1977 y 1981 fue estimada como el 150% del valor medio en 1982. Para el período 1983-1987 se asumió el promedio de las mediciones anuales del período.

Todos los datos de biomasa total y de productividad primaria neta (PPN) reportados en este trabajo son subestimaciones de la realidad debido a que la metodología no destructiva empleada para el muestreo impidió la estimación de la biomasa de las raíces principales de los árboles y del cacao. La PPN es similar en ambos sistemas, debiéndose consignar que los valores del segundo quinquenio son el doble de los del primero, siendo la principal razón de este incremento la mayor producción de hojarasca, en especial la proveniente de podas (Cuadro 4.32).

Durante el segundo quinquenio los valores de incremento de la biomasa aérea, renovación de raíces finas y producción de hojarasca en la asociación de cacao con laurel son similares a los valores más altos publicados para bosques húmedos tropicales (Fassbender, 56). En el mismo período la PPN de $35,7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ para el sistema de cacao/ con poró se ubica en el nivel máximo del ámbito ($10 - 35 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) encontrado para bosques tropicales pluviales (Fassbender, 56; Jordan 100, 101), demostrando la excepcional productividad de esta leguminosa arbórea.

· Índices de productividad (1982 - 1987)

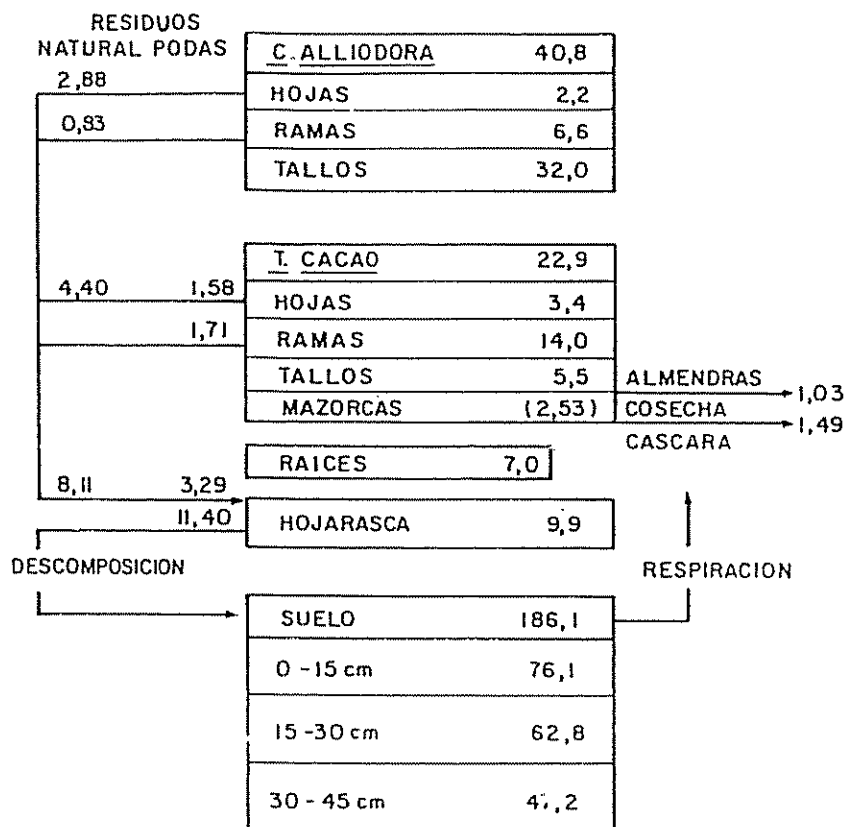
La exportación anual de biomasa por cosecha (semillas y cáscaras) equivale al 3,1% de la biomasa total del sistema con laurel y al 4,0 % de la del sistema con poró (Figuras 4.19 y 4.20). Dicha exportación equivale solamente a 8 y 7% de la PPN para estos sistemas respectivamente.

Cuadro 4.32. Productividad primaria neta (PPN) de los sistemas de cacao (Theobroma cacao) - con laurel (Cordia alliodora) o cacap (I. cacao) - con poró (Erythrina poeppigiana) (materia seca; t.ha⁻¹.a⁻¹).

	<u>C. alliodora</u>		<u>E. poeppigiana</u>	
	<u>I. cacao</u> 1977-82	1983-87	<u>I. cacao</u> 1977-82	<u>I. cacao</u> 1983-87
Producción fitomasa:				
<u>I. cacao</u>	2,0	5,2	1,7	3,8
Arbol sombra	6,4	3,6	4,4	3,2
Rafces	0,8	1,1	0,4	0,8
Producción agrícola (Almendras más cáscara)	0,7	2,5	0,9	2,5
Producción residuos	3,1*	11,4	2,9*	22,9
Renovación raíces**	2,6	6,1	1,2	2,5
Total (P.P.N.)	15,6	29,9	11,5	35,7

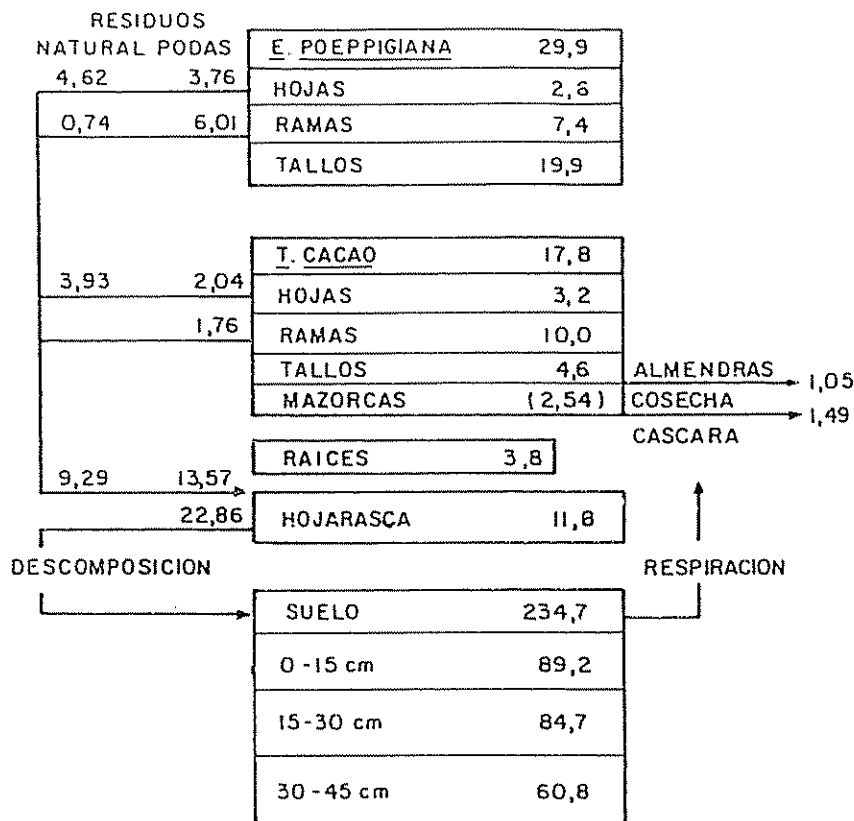
* Valor estimado; residuos de podas no incluidos

** Asumiendo una renovación anual de todas las raíces < 5 mm



Fitomasa: Promedio de dos determinaciones (1982, 1987)
 Reservas suelo: Promedio de dos determinaciones (1982, 1986)
 Cosecha cacao: Promedio de cinco años (1983-1987)
 Producción residuos: Hojarasca natural, promedio de cinco años (1983-1987)
 Residuos de poda, promedio de dos años (85-86; 86-87)

Figura 4.19. Modelo para la distribución y transferencia de materia orgánica en el sistema *Theobroma cacao* - *Cordia alliodora* (reservas $t \cdot ha^{-1}$; transferencias $t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$). (Beer *et al.*, 12, 13; Fassbender *et al.*, 59).



Fitomasa: Promedio de dos determinaciones (1982, 1987)
 Reservas suelo: Promedio de dos determinaciones (1982, 1986)
 Cosecha cacao: Promedio de cinco años (1983-1987)
 Producción residuos: Hojarasca natural, promedio de cinco años (1983-1987)
 Residuos de poda, promedio de dos años (85-86; 86-87)

Figura 4.20. Modelo para la distribución y transferencia de materia orgánica en el sistema *Theobroma cacao* - *Erythrina poeppigiana* (reservas $t.ha^{-1}$; transferencias $t.ha^{-1}.a^{-1}$) (Beer *et al* 12, 13; Fassbender *et al*, 59).

El ciclaje de biomasa (Figuras 4.19 y 4.20; producción anual de hojarasca en relación con la biomasa aérea) es mucho mayor en el sistema de cacao (48%) comparado con el sistema con laurel (18%). Así mismo, la mayor fijación de biomasa en los troncos del laurel lleva a plantear la posibilidad de una mayor competencia entre esta especie y el cacao asociado con ella, especialmente si la madera es exportada del sitio.

· Modelo del ciclo de la materia orgánica

En las Figuras 4.19 y 4.20 se presentan los modelos quinquenales (1982-1987) de la materia orgánica para los sistemas agroforestales de cacao (Theobroma cacao) asociados con laurel (Cordia alliodora) y con poró (Erythrina poeppigiana) en las condiciones de Turrialba, Costa Rica (Beer et al, 12, 13, Fassbender et al, 59).

Para los valores utilizados en las Figuras 4.19 y 4.20 se trata en detalle de (12, 13, 59):

- Biomasa como promedio de dos determinaciones (1982 y 1987) para cacao, laurel y poró en el quinto y décimo año experimental. Raíces finas sin diferenciar entre especies a la edad de 4,5 y 10 años. Materia orgánica del mantillo igualmente medida en el quinto y décimo año experimental.
- Materia orgánica del suelo determinada al quinto y noveno años (1982 - 1986) del experimento.
- Producción de residuos vegetales medidos durante cinco años experimentales (nov. 1983 - oct. 1987). Residuos de podas de dos años (1985 - 1987). Tasa de descomposición de los residuos asumiendo que es igual a la de deposición de residuos.
- Cosecha de cacao durante cinco años experimentales (1983 - 1987, diferenciando las semillas y las cáscaras).

Algunos de los aspectos relevantes sobre la interpretación del modelo holístico del sistema ha sido explicado en el capítulo anterior al considerar los modelos del café. Con este enfoque se pretende describir en forma integral todos los pormenores de los procesos involucrados en el funcionamiento y manejo de los sistemas.

Los dos sistemas en estudio presentan características diferenciadas en su ciclo de materia orgánica. La acumulación total de materia orgánica (biomasa aérea, raíces finas, mantillo) ha alcanzado en promedio en el quinquenio valores experimentales de 80,6 y 60,1 t.ha⁻¹ para cacao con laurel y cacao con poró respectivamente. Lamentablemente no se conocen los datos de biomasa de raíces gruesas. La diferencia en la formación de materia orgánica se localiza especialmente en el tallo (laurel 40,8, poró 26,7 t.ha⁻¹). En el caso del cacao se tienen valores comparables de biomasa, (22,9 y 17,8 t.ha⁻¹) tal como fue indicado anteriormente la sombra de diferentes árboles no ha afectado el desarrollo del cultivo.

Los valores de los frutos presentados en las Figuras 4.19 y 4.20 entre paréntesis simbolizan que la biomasa de frutos del cacao no es una biomasa siempre presente sino más bien transitoria, los datos se refieren a la biomasa cosechada en promedio anual para los cinco años experimentales (1982-1987). Para interpretar la cosecha del cacao como exportación del sistema se puede indicar que en muchas plantaciones de cacao la cáscara se deja en el campo y su reciclaje representa una fuente de formación de nuevas sustancias húmicas. Bajo las condiciones experimentales las cáscaras se han removido del campo experimental. Los índices de exportación con las cosechas a calcularse para los sistemas en estudio incluyen así todo el material producido. En las condiciones experimentales resultan así los siguientes valores:

	Biomasa (t.ha ⁻¹)	Cosecha t.ha ⁻¹ .a ⁻¹	Índice de exportación %
Cacao con laurel	80,6	2,52	3,12
Cacao con poró	60,1	2,54	4,22

La dinámica de los sistemas la expresan los resultados de producción y descomposición de residuos vegetales. Como se indicó anteriormente el sistema con poró se caracteriza por tener tasas de reciclaje de materia orgánica más aceleradas que el sistema con laurel.

4.4.4. Aspectos de la sostenibilidad de los sistemas agroforestales de café y cacao con árboles

Como fue indicado en el Capítulo 2.3, existe una necesidad creciente de sistemas de producción agrícola sostenida para satisfacer las necesidades crecientes de la población y al mismo tiempo mantener

los recursos naturales. Analizando los sistemas agroforestales de café y cacao con árboles de sombra basados en los resultados obtenidos en el Experimento Central del CATIE se puede concluir que ellos representan sistemas sostenibles en función de las siguientes características (Beer *et al.*, 12, 13; Fassbender *et al.*, 59):

- Producción estable de café o cacao, especialmente cuando las especies agrícolas han logrado su madurez.
- Crecimiento rápido del árbol de sombra de laurel (*Cordia alliodora*), alcanzando a la edad de 10 años diámetros de 25 cm, alturas de 15 metros y un volumen maderable de $78 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$.
- Producción de biomasa de 87 y $111 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ a los 10 años para las asociaciones cacao/poró y cacao/laurel.
- Producción alta de residuos vegetales de $11,4 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ para cacao/laurel y $22,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ para cacao/poró; las especies leguminosas y podas de manejo producen valores de residuos y en reciclaje acelerado de la materia orgánica.
- Aumento progresivo de la materia orgánica en la capa de mantillo y especialmente en el suelo mineral con valores absolutos, por ejemplo para cacao/laurel de $15,3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-10}$.

De manera general se puede indicar que el cultivo del café y del cacao bajo condiciones de sombra con árboles de leguminosas en América Latina son sostenibles y tienen una distribución amplia, como fue indicado por Carvajal (28) y Enríquez (42).

4.4.5. Aspectos del impacto en el medio ambiente de los sistemas agroforestales de café y cacao con árboles de sombra

En los últimos años se ha fomentado a nivel internacional la preocupación sobre los recursos naturales tropicales (58). Además de la sostenibilidad, actualmente se hace hincapié en la necesidad de desarrollar sistemas de producción agrícolas "compatibles" con los elementos del medio ambiente como el suelo, el agua, la vegetación, la atmósfera, las campiñas. La evaluación del impacto de un sistema de producción resulta así cada día más importante. Existe una necesidad enorme de predecir si una actividad, por ejemplo, un sistema de producción agrícola presenta atributos de:

- mejoramiento del medio ambiente, por ejemplo de aumento de la materia orgánica en el suelo
- mantenimiento o conservación del medio ambiente, por ejemplo manteniendo el contenido de elementos nutritivos y así la fertilidad del suelo
- deterioro o destrucción del medio ambiente, por ejemplo, a través de la contaminación del agua, erosión de los suelos, etc.

De manera general se debe hacer hincapié en que la información disponible a nivel mundial, a largo plazo sobre sistemas agroforestales no permite una conclusión final sobre su sostenibilidad e impacto ambiental. Para ello será necesario pensar en una red de investigación dentro de diferentes áreas ecológicas y especialmente en diferentes suelos, de media a baja fertilidad.

Los resultados de la investigación en las combinaciones de cacao (*T. cacao*)/ laurel (*C. alliodora*) y cacao (*T. cacao*)/poró (*E. poeppigiana*) en un suelo de relativa alta fertilidad demuestran la sostenibilidad de las cosechas y conservación del medio ambiente. Aparentemente el manejo de los sistemas, con una fertilización adecuada es una forma óptima del uso de la tierra, en función de las características de los sistemas descritos en los acápite anteriores.

En estudios de análisis del impacto en el medio ambiente es necesario la consideración de alternativas de decisión. Los resultados obtenidos en el Experimento Central La Montaña se pueden considerar como hipótesis que para el sistema tradicional de cacao/laurel se ha considerado como alternativa al sistema de cacao/poró. En la evaluación final se concluye que ambos presentan características de sostenibilidad; en el caso de la alternativa con laurel se tiene la ventaja económica de la producción de madera, para el poró no se tiene la ventaja ecológica de mejor dinámica de humus y elementos nutritivos en el suelo.

En una evaluación final de la sostenibilidad y del impacto ambiental de los sistemas agroforestales en estudio es necesario considerar un ciclo de rotación, seguramente a 20 años con la renovación de la plantación de cacao y/o cosecha de laurel (*C. alliodora*). Aquí es necesario extrapolar los resultados obtenidos a 10 años. Basado en la hipótesis de un aumento lineal de la materia orgánica (valor 20 años = duplicación del valor a 10 años) y un aumento de los elementos nutritivos en la fitomasa (árbol, cultivo,

raíces, mantillo) (valor a 20 años 175 a 200 % del valor a 10 años; ver secciones 5.4., 6.4, 7.4; Beer *et al*, 12, 13; Fassbender, 58; Fassbender *et al*, 59), se obtienen los siguientes valores redondeados:

	<u>T.cacao/C.alliodora</u>	<u>T.cacao/E.poeppigiana</u>
Materia orgánica		
(t.ha ⁻¹)	200 - 250	180 - 200
N (kg.t.ha ⁻¹)	1340 - 1530	1260 - 1440
P (kg.t.ha ⁻¹)	120 - 160	120 - 140
K (kg.t.ha ⁻¹)	730 - 840	910 - 1040
Ca (kg.t.ha ⁻¹)	1240 - 1420	890 - 1020
Mg (kg.t.ha ⁻¹)	750 - 860	600 - 690

Los valores, a excepción de los de K, son siempre mayores para T. cacao/C. alliodora.

Con base en la utilización de la madera se tiene un efecto ambiental negativo por la pérdida importante de elementos nutritivos. Su compensación, sin embargo, puede lograrse con la compra de fertilizantes o sea elementos nutritivos, con la venta de madera.

Además es necesario indicar que la extracción de fitomasa y con ello de materia orgánica y elementos nutritivos, al renovar el sistema puede tener efectos ambientales perjudiciales. Más aún, el uso de fuego para la limpieza del campo tendrá efectos destructivos del medio ambiente por las pérdidas de volatilización de C y N y transformación de P, K, Ca y Mg. Por ello es necesario desarrollar técnicas de reciclaje de los "residuos de rotación" para "mantener" el efecto favorable de los sistemas agroforestales.

4.4.6. Materia orgánica en sistemas agroforestales de cultivos en fajas ("alley cropping") o en callejones ("hedgerow cropping")

Las especies agrícolas y maderables más comunes de los sistemas agroforestales de cultivos en fajas o callejones han sido discutidas previamente (sección 2.4.6.). De acuerdo con Young (167, 169) las características más importantes de las fajas o callejones arbóreos, especialmente en la agricultura en campiñas de laderas, son las siguientes (ver también Kass *et al*, 103; Lal, 113, 114):

- Reducir las pérdidas de los horizontes húmicos con materia orgánica de los suelos con base en la cobertura del suelo, con el material de podas que quede sobre el suelo.

- Reducir la escorrentía y con ello mantener la materia orgánica y el suelo con base en el efecto de barrera de las especies arbóreas.
- Mantener o aumentar la fertilidad del suelo en función de la descomposición de la materia orgánica de los residuos de podas.
- Desarrollar paulatinamente terrazas con base en la acumulación de los suelos en las barreras arbóreas.

No existen patrones comparables sobre las especies y la densidad de árboles, frecuencia y altura de las podas, manejo del material de podas ("mulch"), cultivos intercalados con su manejo, fertilización y encalado (103, 113, 114, 155).

A manera de ejemplo se presentan en el Cuadro 4.33 los resultados de las cosechas de maíz (Zea mays), frijoles (Phaseolus vulgaris) y yuca (Manihot esculenta) y la biomasa de podas de las fajas intercaladas de poró (Erythrina poeppigiana) y madero negro (Gliricidia sepium) en las condiciones de Turrialba (102, 103). La fertilización de N aplicada equivale a $150 \text{ kg N.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$. La densidad de siembra del poró es de $555 \text{ árboles.ha}^{-1}$ (distanciamiento 6 x 3 m), la poda se realiza dos veces al año. En las fajas de madero negro se tienen $6666 \text{ árboles.ha}^{-1}$ (distanciamiento 3 x 0,5 m) (Kass *et al*, 102, 103).

En las seis cosechas sucesivas de maíz y frijoles se observan aumentos dentro de los callejones de poró y madero negro. Sin embargo, las cosechas de estos tratamientos fueron menores que el testigo sin árboles intercalados. De la fertilización con nitrógeno resultó un aumento de las cosechas en comparación con el tratamiento sin abonos.

El rendimiento de biomasa de podas es algo contradictorio, observándose en el poró una disminución no esperada al quinto año e igualmente del cuarto al quinto año del madero negro. Las dos especies tienen hábitos de crecimiento diferentes y por ello varía la biomasa estacional producida (Cuadro 4.34). En el mismo cuadro se observa un efecto en detrimento de la fertilización nitrogenada en la producción de biomasa de podas para Erythrina poeppigiana.

Es necesario indicar que los resultados se refieren a las fases iniciales de las interacciones entre los cultivos, las especies arbóreas en las fajas y el medio ambiente. El ciclo de la materia orgánica se ajustará progresivamente a las condiciones cambiantes del sistema. Resultados finales se pueden esperar después de varios años.

Cuadro 4.33. Cosechas de maíz y frijol en cultivos en callejones de Erythrina poeppigiana y Glyricidia sepium en Turrialba, Costa Rica ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) (según Kass et al., 102, 103)

Tratamiento	N $\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$	1982	1983	1984	1985	1986	1987	Promedio
Maíz								
Control	0	2379	2268	1306	2126	1975	3401	2242
	150	2649	2915	1780	2425	3670	4498	2989
<u>Erythrina</u>	0	1588	2088	2621	2192	2332	3063	2314
	150	1483	2524	2502	3670	2291	3614	2420
<u>Glyricidia</u>	0	1427	1681	1449	1757	1965	3764	2007
	150	1745	1460	1385	1431	2273	4316	2101
Frijol								
Control	0	662	716	482	1141	1002	440	740
	150	868	1155	660	1396	1362	515	992
<u>Erythrina</u>	0	304	1330	881	1446	1725	1177	1143
	150	549	1628	1061	1387	1392	1303	1220
<u>Glyricidia</u>	0	321	1095	1004	1296	1448	951	1019
	150	429	1222	1172	1387	1354	1123	1114

Cuadro 4.34. Producción de biomasa, N, K, Ca y Mg en cada poda de Erythrina poeppigiana y de Gliricidia sepium de 18 (1984) a 66 meses (1987). "La Montaña", Turrialba, Costa Rica (según Kass et al., 102, 103).

Erythrina poeppigiana (Parcelas sin N mineral)

Poda (meses)	Fecha	Hojas	Tallos	Biomasa total	N	P	K	Ca	Mg
18	11/83	1168	1622	2790	95	7	56	32	10
24	05/84	1249	1692	2941	64	64	33	30	8
30	11/84	2157	2341	4498	102	13	92	34	11
36	05/85	2088	2672	4760	123	9	66	37	12
42	11/85	2628	3296	5924	167	15	101	69	20
48	05/86	2788	2463	5251	145	10	88	47	22
54	11/86	2926	3361	6287	180	15	108	70	22
60	05/87	2345	2036	4381	149	14	62	46	18
66	11/87	3964	2749	6713	209	18	98	7	22

Gliricidia sepium (Parcelas sin N mineral)

Poda (meses)	Fecha	Hojas	Tallos	Biomasa total	N	P	K	Ca	Mg
18	11/83	1224	2097	3321	102	8	66	45	18
24	05/84	1358	1900	3258	79	5	47	41	13
30	11/84	2412	3937	6350	146	14	122	53	17
36	05/85	1604	2968	4572	117	9	87	40	16
42	11/85	3103	6408	9511	252	20	166	104	48
48	05/86	3250	3904	7154	224	14	147	39	35
54	11/86	3275	2822	6097	201	13	111	79	35
60	05/87	2872	4022	6894	241	20	113	55	22
66	11/87	2581	5687	8258	203	19	113	60	29

Los resultados obtenidos en el Instituto Internacional de Agricultura Tropical (IITA, Ibadán, Nigeria) sobre "alley cropping" son muy promisorios. La producción de biomasa (material de cobertura "mulch") producidas por las diferentes especies arbóreas fue la siguiente: ($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$, 89); Gliricidia sepium 2,3; Thephrosia candida 3,1; Cajanus cajan 4,1 y Leucaena leucocephala 5,0 a 8,0. El sistema agroforestal en fajas mejora en forma sostenida (seis años) las cosechas del maíz (89; Figura 4.21), inclusive en 1981, donde las plantas fueron afectadas por una sequía severa. De la aplicación de $80 \text{ kg N} \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ resulta un aumento notable de la producción (1984 de 2,0 a $3,7 \text{ t} \cdot ha^{-1}$). En la misma Figura 4.21 se observa que la aplicación única del fertilizante nitrogenado no ha logrado tal efecto en la cosecha del maíz; con $160 \text{ kg N} \cdot ha^{-1}$ aumentó la cosecha de maíz a $2,5 \text{ t} \cdot ha^{-1}$.

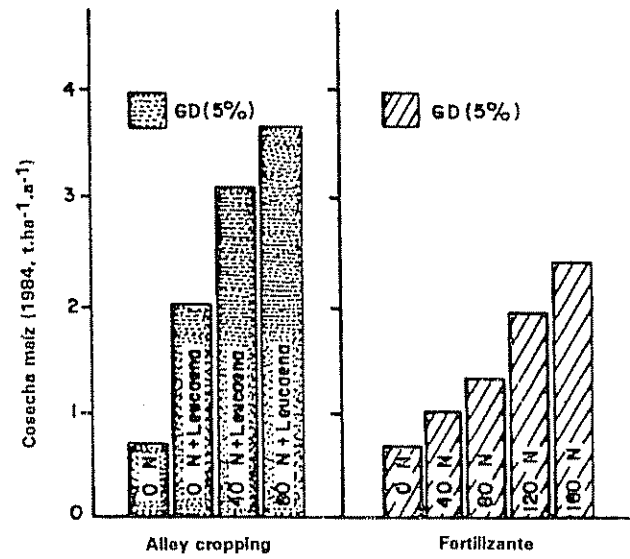
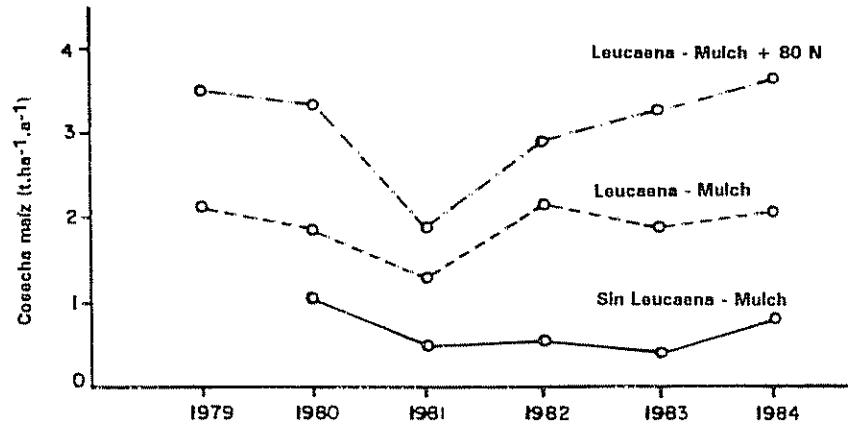


Figura 4.21. Efecto de leucaena en hileras sobre la producción del maíz (1979-1984) en comparación con la fertilización nitrogenada (1984) (según IITA, 89).

En otros estudios realizados entre 1982 y 1987 en un alfisol en Ibadán, Nigeria en asociaciones de callejones de *Leucaena leucocephala* y *Gliricidia sepium* con maíz y frijol coupí (113, 114) se registra una disminución paulatina de las cosechas en promedio de 340 y 96 kg.ha⁻¹.a⁻¹ respectivamente (Figura 4.21). En las 12 cosechas consecutivas en todos los sistemas estudiados se registró una disminución en humus, nitrógeno, bases cambiabiles (Figura 4.22).

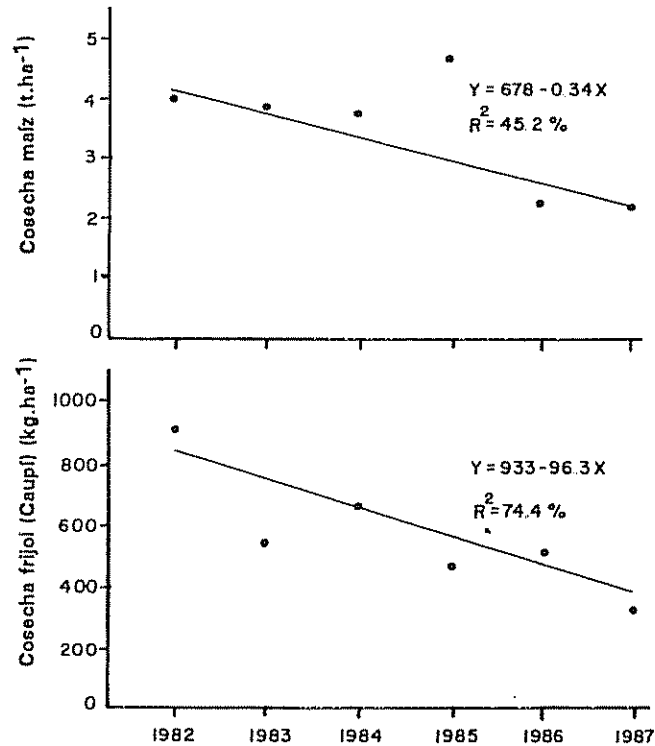


Figura 4.22. Efecto de las cosechas sucesivas en la producción de sistemas agroforestales de callejones en Nigeria (Lal, 113, 114).

Trabajando en suelos de menor fertilidad como ultisoles de Yurimaguas, Perú, en combinaciones de *Inga edulis*, *Erythrina* spp., *Pueraria* spp., *Cajanus cajan*, *Stylosanthes* spp., *Desmodium* spp., *Centrosema* spp., *Cassia reticulata* y *Gliricidia sepium* en combinaciones ("hedgerow") con arroz, Szott *et al* (155) registraron igualmente disminución de las cosechas y disminución de los parámetros de la

fertilidad del suelo. La producción de biomasa en las especies de callejones, especialmente de *Inga*, *Desmodium*, *Cajanus*, fue muy elevada alcanzando a los cinco años hasta $56 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Los residuos de podas de *Cassia* e *Inga* alcanzaron los mejores valores (Figura 4.23). Sin embargo con base en la disminución de las cosechas y la disminución de la materia orgánica en el suelo y con ello casi todos los elementos nutritivos, Szott *et al* (155) concluyen que en suelos de baja fertilidad nativa es poco factible lograr una agricultura sostenida. Ello se debe según esos autores a: a) la sombra de las especies arbóreas en los callejones, b) la competencia por agua y elementos nutritivos entre las especies y c) efectos alelopáticos de algunas especies.

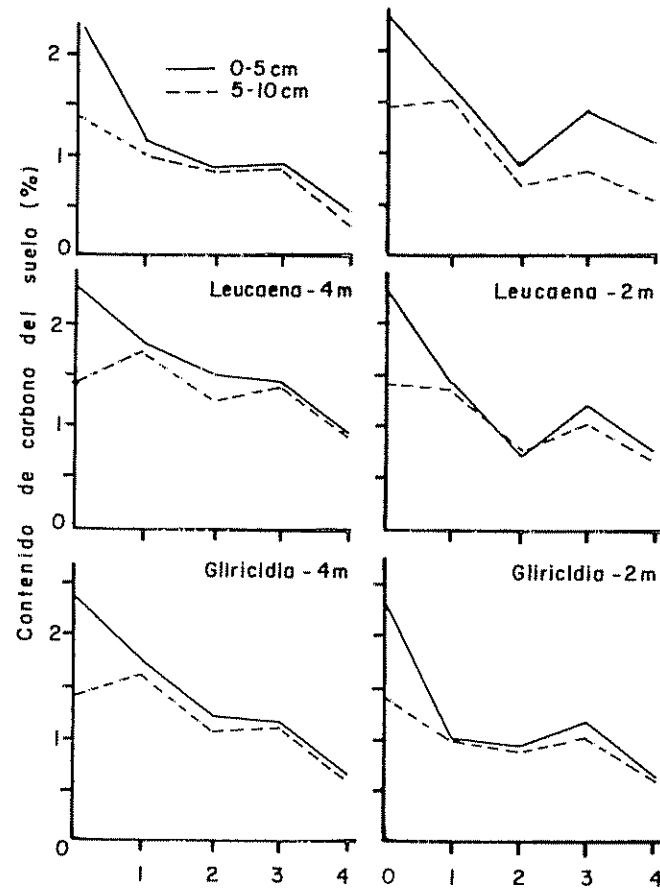


Figura 4.23. Efecto de las cosechas sucesivas de sistemas agroforestales de callejones sobre el humus del suelo (Lal, 113, 114).

4.4.7. Materia orgánica en praderas con árboles de sombra

· Influencia recíproca árboles-pastos-suelos

La combinación de especies arbóreas (madera, frutos, etc.) con especies forrajeras -sistemas agropastoriles o agrosilvopastoriles- tiene una distribución muy amplia dentro de la agricultura tropical y subtropical (sección 2.5). Sin embargo, hasta ahora se ha prestado muy poca atención a los aspectos de la productividad de los sistemas y la influencia recíproca entre especies y el medio ambiente (suelo, clima).

Uno de los primeros estudios sobre la influencia que tienen los árboles sobre el pasto que crece sobre ellos es el de Daccaret y Blydenstein (34) que será descrito a continuación. El trabajo se realizó en las condiciones de Turrialba, Costa Rica, en la finca experimental del actual CATIE. En lotes experimentales de árboles de siete años de edad, de poró gigante (*Erythrina poeppigiana*), saman (*Pithecellobium saman*), madero negro (*Gliricidia sepium*) y laurel (*Cordia alliodora*) sembrados a 5 x 5 m (250 árboles por hectárea) con una vegetación herbácea de pasto guinea (*Panicum maximum*), gramalote (*Paspalum fasciculatum*), comino (*Homolepsis autrensis*) y pangola (*Digitaria decumbens*) se estudió la producción de materia seca, su contenido de proteína y fibra y el contenido de nitrógeno del suelo.

Los resultados obtenidos se han resumido en el Cuadro 4.35. El crecimiento de los árboles fue muy diferenciado. El poró gigante presentó la mejor adaptación y características de producción (dap, altura). En mediciones de la intercepción de la luz se encontró que ella guardaba una relación directa con el desarrollo de las copas; así el poró gigante tenía una intercepción de 55,6 % seguido por madero negro con 34,4, samán con 18,8 y laurel con 6,1 %. La producción presentó una relación inversa a la sombra siendo menor bajo poró y madero negro. Las diferencias entre especies no fue sin embargo estadísticamente significativa.

El contenido de proteína y fibra de la vegetación herbácea forrajera fue muy diferenciado. Las especies leguminosas determinaron mayores contenidos de nitrógeno, especialmente el poró. Igualmente el contenido de nitrógeno, especialmente a una profundidad de 0 a 20 cm, aumentó notablemente bajo la copa de las especies leguminosas.

· Pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*) bajo laurel (*Cordia alliodora*) y poró (*Erythrina poeppigiana*)

Cuadro 4.35. Influencia de árboles sobre la producción y calidad del forraje que crece bajo ellos. (según Daccaret y Blydenstein, 34).

	Sin árboles Testigo	Poró gigante (<i>Erythrina</i>)	Samán (<i>Pithecellobium</i>)	Madero Negro (<i>Gliricidia</i>)	Laurel (<i>Cordia</i>)
Arboles					
Diámetro (DAP, cm)	-----	35,0	14,1	10,4	8,5
Altura (h, m)	-----	15,0	5,1	6,1	5,5
Diámetro copa (m)	-----	10,4	5,1	6,1	3,4
Forraje					
Producción (t,ha ⁻¹)	7,5	6,39	7,20	6,39	7,52
Proteína (%)	6,0	8,37	6,73	6,54	6,17
Fibra (%)	31,86	29,16	28,98	29,67	29,94
Nitrógeno del suelo					
0 - 20 cm (%)	0,28	0,35	0,38	0,32	0,25
20 - 40 cm (%)	0,16	0,15	0,18	0,18	0,15

Como fue indicado anteriormente, en el Experimento Central del CATIE se ha estudiado el comportamiento del pasto estrella (Cynodon plectosctachyus) sólo y en asociación de sombra con laurel (Cordia alliodora, 1512 árboles.ha⁻¹) y con poró (Erythrina poeppigiana, 494 árboles.ha⁻¹). El manejo del experimento ha sido descrito anteriormente (ver secciones 3.4.3, 4.4.1) (Alpizar, 3; Bronstein, 19).

La distribución de la materia orgánica en la fitomasa a la edad de 4,5 años se ha resumido en el Cuadro 4.36. El laurel ha logrado biomasa aérea de 44,9 t.ha⁻¹, de la cual el 70% se acumuló en los tallos. El volumen total de madera (71 m³.ha⁻¹) es mayor que el encontrado en combinaciones con café y cacao; ello es explicable por el número de árboles en pie en las parcelas experimentales. La biomasa del poró se estimó en 13 t.ha⁻¹, siendo mucho menor que la acumulada en laurel. Igualmente la biomasa radicular fue menor en la asociación bajo sombra de poró. Ello refleja en parte el manejo de los árboles de sombra del poró, los cuales se podan dos veces por año.

La producción del pasto estrella es el resultado de cuatro a cinco cortes por año. Las cosechas máximas se lograron en el tercer año experimental, después se observan tendencias de disminución continua. En los años 1983 y 1984 se discontinuó la fertilización del experimento (11 kg N, 33 kg P₂O₅, 11 kg K₂O.ha⁻¹.a⁻¹) y las cosechas disminuyeron notoriamente.

Resumiendo los resultados obtenidos, la producción del pasto estrella mostró una relación directa con la competencia con los árboles por el agua y elementos nutritivos del suelo; fue muy susceptible a la sombra de los árboles, especialmente del laurel y la invasión de malas hierbas (3,19). La investigación presentada debe complementarse con análisis de la calidad del forraje; selección de especies; época, altura y frecuencia de cortes del pasto; agresividad de especies invasoras; manejo del material de poda de los árboles, etc.

"King grass" (Pennisetum purpureum x P. typhoides) y poró (Erythrina poeppigiana)

En un estudio realizado igualmente en el CATIE se ha estudiado la producción de biomasa del poró y del pasto bajo dos densidades de siembra (1667 y 3333 árboles de poró por hectárea) y dos frecuencias de poda (cada tres y cuatro meses). El pasto "king grass" fue cosechado a intervalos variables dependientes de la época del año (73 + 20 días) (140).

Cuadro 4.36. Biomasa de árboles de sombra y producción de pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*) (según Alpizar et al. 3; Bronstein, 19).

	Laurel	Poró
Biomasa (t.ha ⁻¹)		
Hojas	5,68	2,35
Ramas	7,90	3,87
Tallos	31,31	6,75
Raíces	3,56	0,97
Mantillo	2,33	1,86
Suelo (0-45)	252,4	247,2
TOTAL	303,2	263,0
Producción pasto estrella (t.ha ⁻¹ .a ⁻¹ + s)		
	Pasto/laurel	Pasto/poró
1979	10,0	0,2
1980	27,9	28,7
1981	18,8	13,9
1982	16,2	15,9
TOTAL	72,9	67,7
	Pasto solo	
1979	8,0	0,9
1980	18,5	2,7
1981	9,2	1,7
1982	11,1	2,0
TOTAL	46,9	-

De acuerdo con la Figura 4.18 la asociación del poró aumentó la producción de biomasa total al aumentar su densidad ($D_1 = 28$, $D_2 = 43$ %) y frecuencia de poda ($F_1 = 35$, $F_2 = 36$ %). En la biomasa aérea contribuyeron en promedio las hojas, tallos tiernos y tallos leñosos con 51, 13 y 36 % respectivamente.

En promedio se observó un aumento de la producción de proteína cruda total, las combinaciones con poró alcanzaron en promedio 193 % del pasto solo.

La producción del pasto disminuyó bajo todas las variantes estudiadas (Figura 4.25). Los productos de las cosechas se removieron del suelo experimental. La exportación de elementos nutritivos fue muy elevada, alcanzando en el segundo año de estudios 444 kg N y 396 kg $k.ha^{-1}.a^{-1}$ en la asociación con poró y 151 kg N y 345 kg $k.ha^{-1}.a^{-1}$ en el monocultivo del "king grass". La competencia por los elementos nutritivos y la influencia de la sombra ha llevado a una depresión sucesiva de las cosechas del "king grass".

- Pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) con jaúl (*Alnus acuminata*, *lorullensis*)

En las regiones submontanas y montañas de Costa Rica, el jaúl (*Alnus acuminata*) se observa frecuentemente asociado con pastos; el principal pasto utilizado es el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), pero también se usan pastos de corte como el *Pennisetum purpureum* y *Axonopus scoparius*. Aunque no existen estudios integrales de estos sistemas silvopastoriles se presenta en el Cuadro 4.32 la información del crecimiento del componente arbóreo. Según Budowski (24) el crecimiento del jaúl es irregular, generalmente los árboles se cosechan en un ciclo de 15 a 20 años cuando han alcanzado 40 a 50 cm de diámetro. La producción diaria de leche es alta (15 a 20 litros por vaca).

4.4.8. Materia orgánica en otros sistemas agroforestales

- Sistema "Taungya"

La asociación de cultivos temporales con árboles valiosos para producción de madera han sido descritos como sistemas agrosilviculturales o sistema "taungya". Aunque existe una gran cantidad de información sobre las especies combinadas y experiencias sobre el manejo de los sistemas (Capítulo 2.4.2) existen muy pocos estudios integrales (producción de los cultivos, producción maderables, cambios en los suelos).

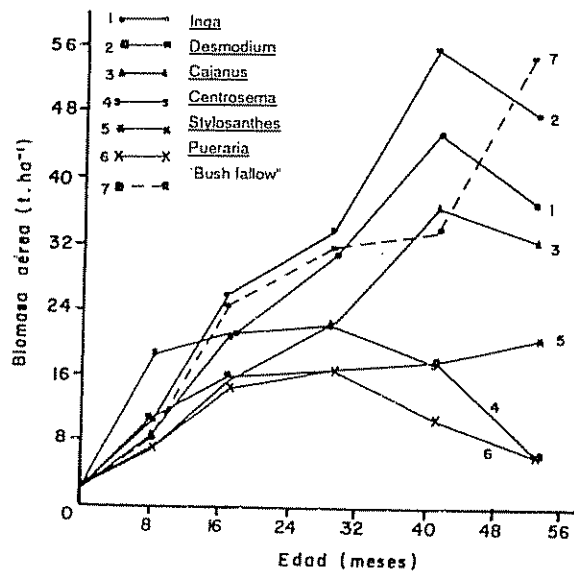


Figura 4.24. Producción de biomasa aérea de leguminosas en callejones de sistemas agroforestales (Szott *et al.*, 1955).

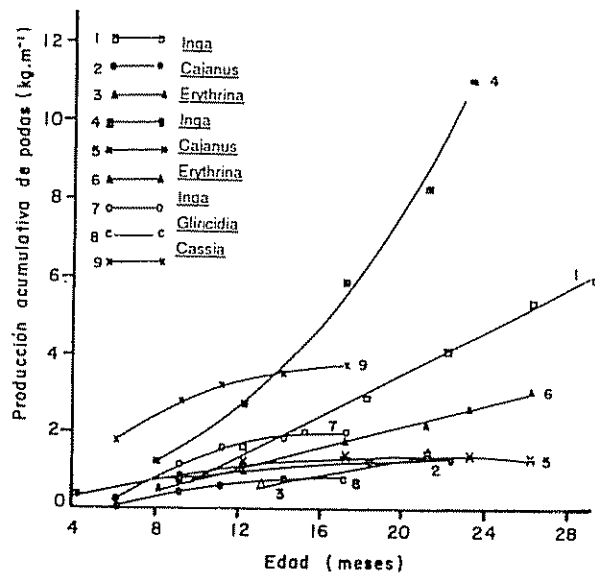


Figura 4.25. Producción acumulativa de biomasa de podas en sistemas agroforestales de callejones (Szott *et al.*, 1955).

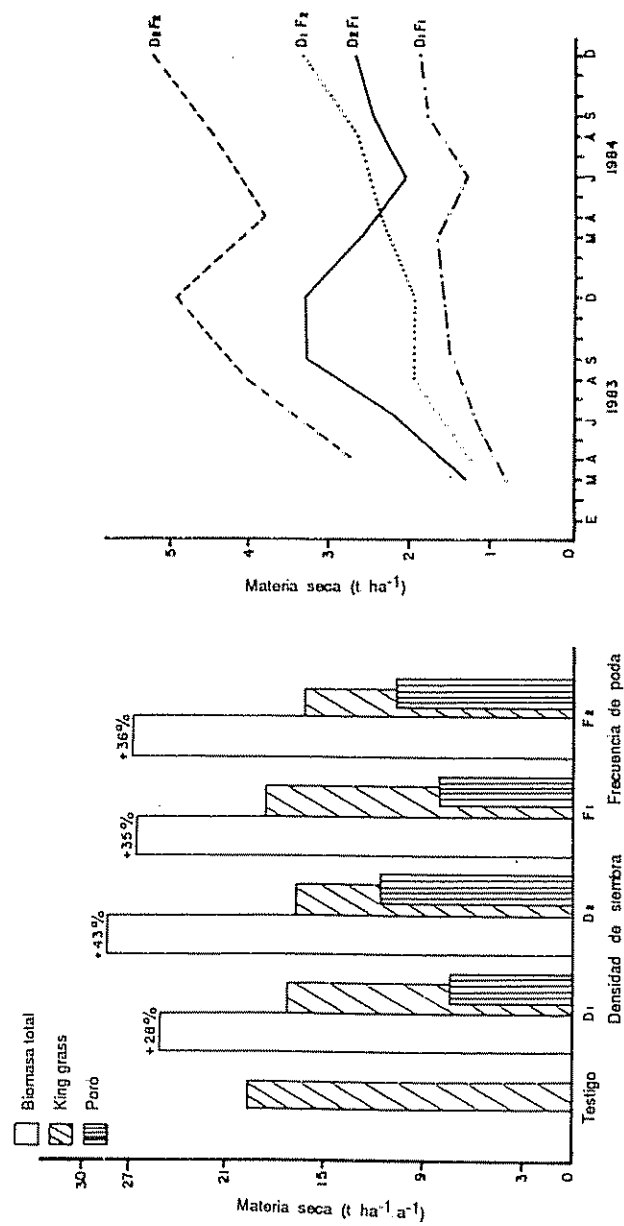


Figura 4.26. Producción de materia seca de "king grass" con poró de acuerdo a la densidad de siembra y frecuencia de podas (1984, t.ha⁻¹.a⁻¹) y de cada una de las podas del poró (t.ha⁻¹) (según Rodríguez, 140).

Algunos de los resultados obtenidos en experimentos realizados en Turrialba, Costa Rica han sido descritos y la producción de madera analizada por Budowski (24). Generalmente se trata de estudios en las fases iniciales de establecimiento de los sistemas, y no existen observaciones a largo plazo. A manera de ejemplo se han sumariado en el Cuadro 4.33. algunos resultados con Gmelina arborea, Eucalyptus deglupta, Cordia alliodora. Además existen algunas experiencias con Cupressus lusitanica, Pinus caribaea, Tectona grandis y Terminalia ivorensis (24, 30, 31).

El desarrollo de las especies arbóreas y sus incrementos son muy favorables. Una competencia por los cultivos agrícolas o depresión de los rendimientos no es siempre constante, las diferencias generalmente no son estadísticamente significativas. Las condiciones ambientales experimentales (suelo, lluvia) de la región son muy favorables y contribuyen en gran parte a los resultados.

• Cercas vivas

La información sobre la productividad de cercas vivas es muy escasa. La forma de propagación y establecimiento, la densidad y la edad de la cerca, así como su manejo, y la frecuencia y altura de las podas, son factores decisivos de la productividad.

La dimensión a utilizar para evaluar la producción es contradictoria entre los autores, modernamente se hace referencia a la producción por longitud y tiempo (p.e. $t.km^{-1}.a^{-1}$). Al evaluar la biomasa de rebrotes de ocho meses en una cerca viva de Erythrina berteroana de cuatro años de edad. Budowski et al (25) encontraron un valor de $12,5 t. (materia\ verde).km^{-1}.a^{-1}$. De acuerdo con Beer (2) la época y frecuencia de la poda determinan valores muy diferenciados de producción, así con dos podas por año E. berteroana alcanzó una biomasa de $5 t.km^{-1}.a^{-1}$, siendo más alta que con una sola poda ($2,9 t.km^{-1}.a^{-1}$).

El efecto del material producido sobre el suelo depende naturalmente del manejo del producto. En el caso de su uso para consumo animal en ramoneo o como material de cobertura ("mulch") en otras áreas o parcelas se tiene una disminución local de la fertilidad del suelo próximo a la hilera de la cerca. Su deposición local como material de cobertura en la franja de crecimiento implica el reciclaje de la materia orgánica y de los elementos nutritivos.

Cuadro 4.37. Crecimiento del jaúl (*Alnus acuminata*) asociado con pastos en Costa Rica (según Budowski, 24).

	Lugar	
	Las Nubes (Alt. 1700 m)	San Rafael (Alt. 1450 m)
Pasto asociado	<i>Pennisetum clandestinum</i> (pastoreo)	<i>P. purpureum</i>
Edad	15	(corte) 6
Espaciamiento de árboles (m)	8 x 12, y hasta 10 x 14	7 x 9 y 7 x 11
Densidad inicial ($n \cdot ha^{-1}$) actual ($n \cdot ha^{-1}$)	132 aprox. 78	---- 159 y 130
Altura promedio (m)	22,0	10,0
Incremento anual de altura ($m \cdot a^{-1}$)	1,47	1,67
Diámetro (dap, cm)	44,8	17,0
Incremento diámetro ($cm^{-1} \cdot a^{-1}$)	2,29	2,83

Cuadro 4.38. Crecimiento de los componentes arbóreos de sistemas Taungya en Turrialba, Costa Rica (ejemplos. según Budowski 24).

	Espacio (n de árboles)	edad (a)	Diámetro (cm)	Altura (h)
<u>Gmelina</u> sólo	1 x 2	1,2	5,41	6,04
con maíz			5,50	5,74
con frijol			5,5	5,84
<u>Gmelina</u> sólo	2 x 3		8,80	6,12
con maíz			7,52	5,55
con frijol			7,31	5,34
<u>Cordia</u> sin poda	1477	4,6	7,74	6,5
raleo 20%	1397		8,21	6,9
raleo 40%	1520		7,88	6,7

RESUMEN

- La materia orgánica del suelo se describe considerando la capa de mantillo y el humus en el suelo mineral, se describe su composición química, su formación e importancia.
- Se hace especial hincapié en la descripción del ciclo de la materia orgánica en ecosistemas forestales. Se trata en detalle el contenido de la materia orgánica diferenciando ecosistemas montanos y de llanura siempreverdes. Como un ejemplo del análisis de sistemas se presentan todos los detalles considerados en un estudio del ecosistema montano de San Eusebio, en Venezuela.
- La producción y descomposición de los residuos vegetales es el puente de enlace entre los componentes bióticos y abióticos del ecosistema. Se analiza la información disponible de la literatura.
- Se presenta un modelo de la materia orgánica para el ecosistema de San Eusebio y se consideran todas sus implicaciones.
- La tala, quema y la agricultura migratoria obligan a cambios no reversibles del ciclo de la materia orgánica. Se describen también los aspectos de la materia orgánica en sistemas de producción agrícola y pecuaria.
- Para el manejo agronómico de la materia orgánica se consideran: el manejo de los barbechos, residuos vegetales y animales y los abonos verdes.
- En los bosques de regeneración se logra una recuperación del ciclo de la materia orgánica. En las plantaciones forestales se produce una biomasa generalmente más elevada que en bosques primarios.
- Se discuten los aspectos generales para la preparación de modelos del ciclo de la materia orgánica en sistemas agroforestales. A manera de ejemplo se describen todos los detalles considerados en sistemas de café y cacao con árboles de sombra y de pasto estrella con y sin árboles de sombra.

- Las reservas de materia orgánica del sistema de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) en comparación con el sistema de café con poró (Erythrina poeppigiana) se diferencian especialmente por la acumulación en los tallos del laurel. La producción agrícola y la maderable son muy diferenciadas. El ciclo de la materia orgánica es regulado por la producción y descomposición de los residuos vegetales, siendo más acelerado bajo la sombra de poró por sus podas periódicas. Se presenta y discute el modelo de la materia orgánica.
- Para el modelo quinquenal (1983 - 1987) del cacao (Theobroma cacao) con laurel (Cordia alliodora) y con poró (Erythrina poeppigiana) se tienen los datos del inventario (determinación de biomasa a cinco años -1982- y 10 años -1987-, de producción de cacao (nueve años), madera (10 años) y de producción de residuos vegetales (cinco años). La producción primaria neta de estos sistemas es elevada. También se presenta un modelo para la materia orgánica.
- Se presentan resultados obtenidos en sistemas agroforestales con cultivos en hileras o callejones ("alley cropping", "hedgerow cropping").
- Se describe el ciclo de la materia orgánica de algunos ejemplos de sistemas silvopastoriles logrados en Costa Rica. Sin embargo, la información es aún escasa.
- Se consideran algunos aspectos de la materia orgánica en sistemas Taungya, y cercas vivas.

LITERATURA

1. ADIS, J.; FURCH, K.; IRMLER, U. 1979. Litter production in the Central Amazonian black water inundation forest. *Tropical Ecology (India)* 20:236-245.
2. ALPIZAR, L. et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) y café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. I. Biomasa y reservas nutritivas. *Turrialba (C.R.)* 35:233-242.

3. _____, 1986. Results of association of pastures with shade trees at Central Experiment of CATIE. In Advances in Agroforestry Research (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. Ed. by J.W. Beer; H.W. Fassbender; J. Heuvelodp. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. p. 209-215.
4. _____, et al. 1986. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with Cordia alliodora and Erythrina poeppigiana in Costa Rica. I. Inventory of organic matter and nutrients. Agroforestry Systems (Holanda) 4:231-257.
5. ARANGUREN, J. et al. 1982. Cycles of nitrogen of tropical perennial crops. I. Coffea. Plant and Soil (Holanda) 67:247-257.
6. _____. 1982. Cycles of nitrogen of tropical perennial crops under shade. II. Cacao. Plant and Soil (Holanda) 67:259-269.
7. BEER, J.W. 1987. Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cacao and tea. Agroforestry Systems (Holanda) 5:3-13.
8. _____; FASSBENDER, H.W.; HEUVELDOP, J. (eds.). 1987. Advances in Agroforestry Research (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. 379 p.
9. _____. 1987. Experiences with fence line fodder trees in Costa Rica. In Advances in Agroforestry Research (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. Ed. by J.W. Beer; H.W. Fassbender; J. Heuvelodp. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. p. 215-222.
10. _____. 1988. Litter production and nutrient cycling in coffee (Coffea arabica) or cacao (Theobroma cacao) plantations with shade trees. Agroforestry Systems (Holanda) 7:103-114.
11. _____; FASSBENDER, H.W.; HEUVELDOP, J. (eds.). 1989. Avances en la Investigación Agroforestal (1985, Turrialba, C.R.). Actas del seminario. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 147. 451 p.

12. _____, et al. 1990. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with Cordia alliodora and Erythrina poeppigiana in Costa Rica. V. Productivity indices, organic matter models and sustainability over ten years. *Agroforestry Systems (Holanda)* 12:229-240.
13. _____, et al. 1991. Balance quinquenal de biomasa, productividad y sostenibilidad en dos sistemas agroforestales de cacao (Theobroma cacao) en Costa Rica. In *Simposio Agroforestal en México*. Nuevo León, Linares, Méx., s.n. p. 97-110.
14. BERNHARD-REVERSAT, F. 1972. Decomposition de la litiere de fuilles en foret ombrophylle de basse Cote d' Ivoire. *Oecologia Plantarum (Francia)* 7:279-300.
15. _____. 1975. Researches sur l' ecosysteme de la foret subecuatorial de basse, Cote d'Ivoire. VI. Les cycles des macroelements. *La Terre et la Vie (Francia)* 29:229-254.
16. _____. 1977. Researches sur les variations stationnelles des cycles biogeochimiques en foret ombrophile de Cote d' Ivoire. *Cahiers ORSTOM: Serie Pedologie (Francia)* 25:175-189.
17. BOYER, J. 1973. Cycles de la matiere organique et des element mineraux dans une cacaoyere camerounaise. *Cafe, Cacao, The (Francia)* 17:2-23.
18. BRAY, J.R.; GORHAM, E. 1964. Litter production of the world. *Advances Ecological Research (EE.UU.)* 2:101-157.
19. BRONSTEIN, G.V. 1984. Producción comparada de una pastura de Cynodon plectostachyus asociada con árboles de Cordia alliodora, con árboles de Erythrina poeppigiana y sin árboles. Tesis Mag.Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 110 p.
20. BROWN, S.; LUGO, A.E. 1984. The storage and production of organic matter in tropical forest and their role in the global carbon cycle. *Biotropica (EE.UU.)* 14:161-687.
21. _____. 1984. Biomass of tropical forest: a new estimate based on forest volumes. *Science (EE.UU.)* 223:1290-1293.
22. BRUIJNZEEL, L.A.; WIERSUM, K.F. 1985. A nutrient balance sheet for Aqathis dammara Warb. plantation forest under various management conditions in Central Java, Indonesia. *Forest Ecology and Management (Holanda)* 10:195-208.

23. BUDOWSKI, G. 1965. Distribution of tropical American forest species in the lighth of successional processes. Turrialba (C.R.) 15:40-42.
24. _____. 1983. An attempt to quantify some current agroforestry practices in Costa Rica. In Huxley, P.H. (ed.). Plant research and agroforestry. Nairobi, Kenia, ICRAF. p. 43-62.
25. _____ et al. 1984. Productividad de una cerca viva de Erythrina berteroa en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, C.R., CATIE. 9 p.
26. CADIMA, A.; ALVIM, P. DE T. 1967. Influencia del árbol de sombra Erythrina glauca sobre algunos factores edafológicos relacionados con la producción de cacao. Turrialba (C.R.) 17:330-336.
27. CANNEL, M.G.R. 1982. World forest biomass and primary production data. New York, EE.UU., Academic Press. 391 p.
28. CARVAJAL, J.F. 1984. Cafeto - cultivo y fertilización. 2 ed. Berna, Suiza, Instituto Internacional de la Potasa. 254 p.
29. CATANI, R.A.; MORAES, F.P. 1958. A composicao química do cafeiro. Quantidade e distribucao de N, P₂O₅, K₂O, CaO e MgO en cafeeiro de 1 a 5 anos de idade. Revista de Agricultura (Bra.) 33:45-52.
30. COMBE, J.; BUDOWSKI, G. 1979. Clasificación de las técnicas agroforestales: una revisión de literatura. In Taller Sistemas Agroforestales en América Latina (1979, Turrialba, C.R.). Actas. Ed. por G. de las Salas. Turrialba, C.R., CATIE. p. 17-48.
31. _____; GEWALD, N.J. (eds.). 1979. Guía de campo de los ensayos forestales del CATIE en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, C.R., CATIE. 378 p.
32. CONFORTH, I.S. 1970. Leaf-fall in a tropical rain forest. Journal of Applied Ecology (G.B.) 7:603-608.
33. CRUZ, A. DE LA. 1964. A preliminary study of organic detritus in a tropical forest ecosystem. Revista de Biología Tropical (C.R.) 12:174-185.

34. DACCARET, M.; BLYDENSTEIN, J. 1968. La influencia de árboles leguminosos y no leguminosos sobre el forraje que crece bajo ellos. Turrialba (C.R.) 18:405-408.
35. DIAZ-ROMEY, R. et al. 1970. Contenido de la materia orgánica y nitrógeno de los suelos de América Central. Turrialba (C.R.) 20:185-192.
36. DOMMERMUES, J. 1963. Les cycles biogéochimiques des éléments minéraux dans les formations tropicales. Bois et Forêts des Tropiques (Francia) 87:9-25.
37. DUKE, J.A. 1981. Handbook of legumes of world economic importance. New York, EE.UU., Plenum Press. s.p.
38. EDWARDS, P.J. 1977. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. II. The production and disappearance of litter. Journal of Ecology (G.B.) 65:971-992.
39. _____; GRUBB, P.J. 1977. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. Journal of Ecology (G.B.) 65:943-969.
40. EGUNJOBI, J.K.; BADA, S.O. 1979. Biomass and nutrient distribution in stands of Pinus caribaea in the dry zone of Nigeria. Biotropica (EE.UU.) 11:130-135.
41. ENRIQUEZ, G. 1979. Ensayo Central de cultivos perennes en comparación con algunos anuales. In Taller Sistemas Agroforestales en América Latina (1979, Turrialba, C.R.). Actas. Ed. por G. de las Salas. Turrialba, C.R., CATIE. 119-202 p.
42. _____. 1983. El cultivo del cacao. Turrialba, C.R., CATIE. 162 p.
43. EWELL, J. 1976. Litter fall and leaf decomposition in a tropical forest succession in eastern Guatemala. Journal of Ecology (G.B.) 64:293-308.
44. _____. et al. 1982. Leaf area, light transmittance, roots and leaf damage in nine tropical plant communities. Agro-Ecosystems (Holanda) 7:305-326.
45. FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). 1983. El reciclaje de materias orgánicas en la agricultura de América Latina. FAO Soil Bulletin no. 51. 253 p.

46. _____. 1984. Improved production systems as an alternative to shifting cultivation. FAO Soil Bulletin no. 52. s.p.
47. FASSBENDER, H.W.; TSCHINKEL, H. 1974. Relación entre el crecimiento de plantaciones de Cupressus lusitanica y las propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. Turrialba (C.R.) 24:141-149.
48. _____. 1975. Experimentos de laboratorio para el estudio del fuego de la quema de restos vegetales sobre las propiedades del suelo. Turrialba (C.R.) 25:249-254.
49. _____. 1977. Ciclos de elementos nutritivos en ecosistemas forestales tropicales y su transformación con la agricultura rotativa. In Reunión - Taller sobre ordenación y conservación de suelos en América Latina. Lima, Perú, FAO/SIDA. s.p.
50. _____.; GRIMM, U. 1981. Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. II. Producción y descomposición de residuos vegetales. Turrialba (C.R.) 31:39-47.
51. _____.; GRIMM, U. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. IV. Modelos y conclusiones. Turrialba (C.R.) 31:101-108.
52. _____. et al. 1985. Ciclos de la materia orgánica y elementos nutritivos en cultivos tropicales permanentes, experiencias con cacao. In Seminar on Nutrient Research and Low Input Agriculture for the Tropics. Anais. Ed. por P. Cabala. Itabuna, Bra., CEPLAC. p. 231-257.
53. _____. et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora), café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. III. Modelos de la materia orgánica y elementos nutritivos. Turrialba (C.R.) 35:403-413.
54. _____.; BORNEMISZA, E. 1987. Química de suelos. San José, C.R., IICA. 420 p.

55. _____; ALPIZAR, L. 1987. Criteria for the evaluation of organic matter and nutrient cycling in agroforestry systems. In *Advances in Agroforestry Research* (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. Ed. by J.W. Beer; H.W. Fassbender; J. Heuveldop. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. p. 91-103.
56. _____. 1987. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. CATIE. Serie de Materiales de Enseñanza no. 29. 475 p.
57. _____. et al. 1988. Modelling 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) 6:49-62.
58. _____. 1990. Umweltverträgliche Landnutzung in den feuchten Tropen. In DSE/ATSAF Landnutzung in den feuchten Tropen. Actas del Seminario. Feldafing, Alemania, R.F., s.n. p. 60-79.
59. _____. et al. 1991. Ten years balances of organic matter and nutrients in agroforestry systems at CATIE, Costa Rica. *Forest Ecology and Management* (Holanda) 45:173-183.
60. FÖLSTER, H.; FASSBENDER, H.W. 1984. Okopedologische Grundlagen der Bodennutzung in den Tropen und Subtropen. s.l., Alemania, R.F., Univ. de Gotinga, Facultad Ciencias Forestales. 199 p.
61. _____; KHANNA, P. 1976. A tropical evergreen forest site with perched water table, Magdalena Valley, Colombia. *Oecologia Plantarum* (Francia) 11:298-320.
62. _____; SALAS, G. DE LAS. 1976. Litter fall and mineralization in three tropical evergreen forest stands, Colombia. *Acta Científica de Venezuela* (Ven.) 37:192-202.
63. FRISSELL, M.J. (ed.). 1978. Cycling of mineral nutrients in agriculture ecosystems. Amsterdam, Holanda, Elsevier Scientific Publishing. 358 p.
64. FOURNIER, L.A. 1980. Fundamentos ecológicos de cultivos del café. IICA. Publicación Miscelánea. 29 p.
65. _____. 1984. Recursos naturales. San José, C.R., Editorial Universidad Estatal a Distancia. 216 p.

66. GHOLZ, H. L. et al. 1987. Agroforestry, realities and possibilities. s.l., Holanda, Nijhoff. 227 p.
67. GLOVER, N. 1981. Coffee yields in a plantation of Coffea arabica var. Caturra shaded by Erythrina poeppigiana with and without Cordia alliodora. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 17. 25 p.
68. _____; BEER, J.W. 1983. Spatial and temporal fluctuation of litter fall in the agroforestry associations Coffea arabica - Erythrina poeppigiana and C. arabica - E. poeppigiana - Cordia alliodora. Turrialba, C.R., CATIE. 43 p.
69. GOLDBERG, A.D.; JIMENEZ AVILA, E. 1982. Estudios ecológicos en el agroecosistema cafetalero. IV. Distribución de la biomasa aérea en diferentes estratos del cafetal. Xalapa, Veracruz, Méx., INIREB 8030120. s.p.
70. GOLLEY, F.B. et al. 1971. La biomasa y la estructura mineral de ambos bosques de Darién, Panamá. Turrialba (C.R.) 21:186-196.
71. _____ et al. 1975. Mineral cycling in a tropical moist forest ecosystem. Athenas, EE.UU., University of Georgia Press. 248 p.
72. _____, 1983. Ecosystems of the world 14a: tropical rain forest ecosystems. Amsterdam, Holanda, Elsevier Scientific Publishing Company. s.p.
73. GREENLAND, D.J.; KOWAL, J.M.L. 1960. Nutrient content in a moist tropical forest of Ghana. Plant and Soil (Holanda) 12:154-174.
74. GRIMM, U.; FASSBENDER, H.W. 1981. Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. I. Inventario de las reservas orgánicas y minerales (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Al, Na). Turrialba (C.R.) 31:27-37.
75. _____. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. III. Ciclo hidrológico y translocación de elementos químicos con el agua. Turrialba (C.R.) 31:89-99.

76. HASE, H.; FOLSTER, H. 1982. Bioelement inventory of a tropical (semi) evergreen seasonal forest on eutrophic soils, Western Llanos, Venezuela. *Oecologia Plantarum* (Francia) 17:331-346.
77. HENDRY, C.D.; BERISH, C.W.; EDGERTON, E.S. 1984. Precipitation chemistry at Turrialba, Costa Rica (Central America). s.l., EE.UU., Water Resources Research. s.p.
78. HERRERA, R. et al. 1978. Amazon ecosystems: their structure and functioning with emphasis on nutrients. *Interscience* (EE.UU.) 3:223-232.
79. _____; JORDAN, C.F. 1981. Nitrogen cycle in a tropical rain forest: the Caatinga of low mineral nutrient status. *Ecol. Bull. (Suecia)* 33:493-505.
80. _____; KLINGE, H. 1982. Phytomass of tall Amazon Caatinga forest near San Carlos de Rio Negro, Southern Venezuela. *Vegetatio* (Holanda). s.n.t.
81. _____ et al. 1987. Coffee and cacao plantations under shade trees in Venezuela, recent advances in agroforestry research. In *Advances in Agroforestry Research* (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. Ed. by J.W. Beer; H.W. Fassbender; J. Heuveldop. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. p. 173-181.
82. HEUVELDOP, J.; LAGEMANN, J. (eds.). 1981. *Agroforestry* (1981, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. Turrialba, C.R., CATIE. 102 p.
83. _____ et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) y de café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. II. Producción agrícola, maderable y de residuos vegetales. *Turrialba* (C.R.) 35:347-355.
84. _____ et al. 1988. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with Cordia alliodora and Erythrina poeppigiana in Costa Rica. II. Cacao and wood production; litter production and decomposition. *Agroforestry Systems* (Holanda) 6:37-48.
85. HOPKINS, B. 1966. Vegetation of the Olokweji forest reserve, Nigeria. IV. The litter and soil with special reference to their seasonal changes. *Journal of Ecology* (G.B.) 54:687-703.

86. HOZUMI, K. et al. 1969. Production ecology of tropical rain forest in south-west Cambodia. II. Photosynthetic production in an evergreen seasonal forest. *Nature and Life in Southern Asia* 6:57-81.
87. HUTTEL, C.; BERNHARD-REVERSAT, F. 1975. Recherches sur l'écosystème de la forêt subéquatoriale de basse Côte-d'Ivoire. *La Terre et la Vie* (Francia) 29:203-228.
88. HUXLEY, P.A. 1983. Plant research and agroforestry. Nairobi, Kenia, ICRAF. 617 p.
89. IITA (INTERNATIONAL INSTITUTE OF TROPICAL AGRICULTURE). 1985. IITA - Research highlights 1984. Ibadán, Nigeria. s.p.
90. IMBACH, A. C. et al. 1989. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with laurel (Cordia alliodora) and poró (Erythrina poeppigiana) in Costa Rica. IV. Water balances, nutrient inputs and lixiviation. *Agroforestry Systems* (Holanda) 8:267-287.
91. _____; FASSBENDER, H.W.; BEER, J.W. 1992. Producción de residuos vegetales de cacao (Theobroma cacao) con laurel (Cordia alliodora) y con poró (Erythrina poeppigiana) en Costa Rica. *Theobroma* (Bra.). (sin publicar).
92. JENNY, H. 1959. Causes of the high nitrogen and organic matter content of certain tropical forest soils. *Soil Science* (EE.UU.) 69:63-69.
93. JIMENEZ, E.; MARTINEZ, P. 1979. Estudios ecológicos del agroecosistema cafetalero. II. Producción de materia orgánica en diferentes tipos de estructura. *Biótica* (Mex.) 4(3):109-126.
94. JORDAN, C.F.; KLINE, J.R. 1972. Mineral cycling. Some basic concepts and their application in a tropical rain forest. *Annual Review of Ecology and Systematics* (EE.UU.) 3:33-50.
95. _____; UHL, C. 1978. Biomass of a "tierra firme" forest of the Amazon basin. *Oecologia Plantarum* (Francia) 13:387-400.
96. _____; ESCALANTE, G. 1980. Root productivity in Amazonian rain forest. *Ecology* (EE.UU.) 61:14-18.

97. _____; HERRERA, R. 1981. Tropical rain forest: are nutrients really critical? *The American Naturalist* (EE.UU.) 117:167-180.
98. _____. 1981. Biogeochemical cycles and tropical forest. *The American Naturalist* (EE.UU.) 117:167-180.
99. _____, *et al.* 1982. The nitrogen cycle in a "tierra firme" rain forest on oxysol in the Amazon territory of Venezuela. *Plant and Soil* (Holanda) 67:325-332.
100. _____. 1983. Productivity of tropical rain forest ecosystem and their implication for their use as a future wood and energy sources. *In* Golley, F.B. *Ecosystems: structure and function*. Amsterdam, Holanda, Elsevier Scientific Publishing. p. 117-136. (Ecosystems of the World no. 14 A).
101. _____. 1985. *Nutrient cycling in tropical forest ecosystems*. New York, EE.UU., J. Willey. 190 p.
102. KASS, D.L. 1986. Alley cropping of anual food crops with woody legumes in Costa Rica. *In* *Advances in Agroforestry Research* (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. Ed. by J.W. Beer; H.W. Fassbender; J. Heuveldop. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. p. 197-208.
103. _____, *et al.* 1989. Resultados de seis años de investigación de cultivo en callejones (alley cropping) en "La Montaña", Turrialba, Costa Rica. *El Chasqui* (C.R.) no. 19:5-24.
104. KLINGE; H.; RODRIGUEZ, W.A. 1968. Litter production in an area of the Amazon terra firme. *Amazoniana* (Bra.) 1:287-310.
105. _____. 1973. Biomass and organic matter in the soil of a tropical rain forest of Central Amazonia. *Acta Científica Venezolana* (Ven.) 24:174-181.
106. _____. 1979. Bilanzierung von Hauptnährstoffen im Okosystem tropischer Regenwald (Manaos). *Biogeotropica* 7:59-77.
107. _____. 1977. Fine litter production and nutrient return to the soil in three natural stands of Eastern Amazonia. *Geo-Eco-Trop.* 1:159-167.

108. _____; HERRERA, R. 1979. Biomass studies in Amazon caatinga forest in Southern Venezuela. 1. Standing crop of composite root mass in selected stands. *Tropical Ecology (India)* 19:90-110.
109. _____. 1983. Phytomass structure of natural plant communities on spodosols of Southern Venezuela: the tall caatinga forest. *Vegetatio (Holanda)* 53:65-84.
110. _____. 1985. Lowland Amazonas forest, bioelements and geochemistry. *In* *Symposio del Trópico Húmedo*. (I., Belem, Bra.). s.n.t. (Sin publicar).
111. KUMARON, J.; ALVIM, P. DE T. 1981. Root biomass in a mature cacao (*Theobroma cacao*) plantation. *Theobroma (Bra.)* 11:77-85.
112. KUNKEL-WESTPHAE, J.; KUNKEL, P. 1979. Litter fall in a Guatemala primary forest, with details of leaf shedding by some common trees. *Journal of Ecology (G.B.)* 67:665-686.
113. LAL, R. 1989. Agroforestry systems and surface management of a tropical alfisol. I. Soil moisture and crop yields. *Agroforestry Systems (Holanda)* 8:7-29.
114. _____. 1989. Agroforestry systems and surface management of a tropical alfisol. III. Changes in soil chemical properties. *Agroforestry Systems (Holanda)* 8:113-132.
115. LAUDELOUT, H.; MEYER, J. 1954. Les cycles d'éléments minéraux et de matière organique en forêt équatoriale congolaise. *In* *International Congress of Soil Science (5., 1954, Léopoldville, Congo Belga)*. Transactions. s.n.t. v. 2, p. 267-272.
116. LING, A.H. 1984. Litter production and nutrient cycling in a mature cocoa plantation on inland soils of Peninsular Malaysia. *In* *International Conference on Cocoa and Coconuts: Progress and Outlook*. Ed. by E. Pushparajah. Kuala Lumpur, Malaysia, The Incorporated Society of Planters. p. 451-467.
117. LUNDGREN, B. 1978. Soil conditions and nutrient cycling under natural and plantation forest in Tanzanian highlands. Swedish University of Agricultural Sciences. Dept. of Forest Soils. Reports in Forest Ecology and Forest Soils no. 31. s.p.

118. MACHADO, A. 1946. The effect of shade, soil and cultural practices on the early development of the *Coffea* tree. Horticultural Abstracts (G.B.) 21:3009.
119. MAGDE, D.S. 1965. Leaf fall and litter disappearance in a tropical forest. Pedobiología 5:273-288.
120. MALAVOLTA, E. *et al.* 1963. Estudos sobre a alimentacao mineral do cafeiro. XI. Extracao de macro e micronutrientes na colheita pelas variedades "Bourbon Amarelo", "Caturra Amarelo" e "Mundo Novo". Turrialba (C.R.) 13:188-189.
121. _____; YAMADA, T.; GUIDOLIN, J.A. 1981. Nutricao e aundacao do cafeiro. s.l., Bra., Instituto da Potassa & Fosfato, Instituto Internacional da Potassa. 224 p.
122. MEDINA, E.; KLINGE, H. 1983. Productivity of tropical forest and tropical wood lands. *In* Encyclopedia of plant physiologie. Ed. by O.L. Lange. *et al.* Berlín, Alemania, R.F., Springer Verlag. p. 281-303.
123. MONTOYA, L.A.; SYLVAIN, P.G.; UMAÑA, R. 1961. Effect of light intensity and nitrogen fertilization upon growth differentiation balance in *Coffea arabica* L. Coffee (C.R.) 3:97-104.
124. NAIR, P.K.R. 1979. Intensive multiple cropping with coconuts in India, principles, programmes and prospects. Berlín, Alemania, R.F., Paul Parey Verlag. 149 p.
125. _____, 1984. Soil productivity aspects of agroforestry. ICRAF. Science and Practice of Agroforestry no. 1. 85 p.
126. _____. 1988. Agroforestry systems in the tropics. Dordrecht, Holanda, Kluwer. 664 p.
127. NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES (EE.UU.). 1979. Tropical legumes: resources for the future. Washington, D.C., EE.UU. s.p.
128. NAVARRO, C. 1986. Producción de biomasa de *Eucalyptus deglupta* en una plantación de ocho años en Turrialba. Turrialba, C.R., CATIE. 4 p.
129. NYE, P.H.; GREENLAND, D.J. 1964. Changes in the soil after clearing tropical forest. Plant and Soil (Holanda) 21:101-110.

130. ODUM, H.T; PIGEON, R.F. (eds.). 1970. A tropical rain forest. Springfield, Va., EE.UU., Atomic Energy Commission. 1660 p.
131. OGAWA, H. et al. 1965. Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand. II. Plant biomass. *Nature and Life in Southern Asia* 4:49-80.
132. _____. 1978. Litterfall and mineral nutrient of litter in Pasoh forest. *Malayan Nature Journal (Malasia)* 30:375-380.
133. OHLER, F.M.J. 1980. Phytomass and mineral content in undisturbed forest. *CELOS Rapporten (Surinam)* no. 132. s.p.
134. PERES, J.R.R. et al. 1984. Litter production in areas of Brazilian Cerrados. *Pesq. Agrop. (Bra.)* 18:1037-1043.
135. PRINZ, D. 1986. Möglichkeiten der Erhöhung der Flächenproduktivität in Kleinbaerlichen Anbau- systemen der Tropen durch Formen gelenkter Brache. *Göttinger Beiträge zur Land-und Forstwirtschaft in den Tropen und Subtropen (Alemania, R.F.)* 12:21-56.
136. PROCTOR, J. 1983. Tropical forest litterfall. I. Problems of data comparison. *In Tropical rain forest and managment.* Ed. by S.L. Sutton. et al. Oxford, G.B., Blackwell Scientific Publications. p. 267-273.
137. _____. 1983. Tropical forest litterfall. II. The data set. *Tropical rain-forest. The leads symposium.* s.n.t. p. 83-113.
138. ROBERTSON, G.P.; HERRERA, R.; ROSWALL, T. 1982. Nitrogen cycling in ecosystems of Latin America. *Plant and Soil (Holanda)* 67, Special Volume.
139. RODIN, L.E.; BRAZILEVICH, N.I. 1967. Production and mineral cycling in terrestrial vegetation. London, G.B., s.n. 288 p.
140. RODRIGUEZ, R.A. 1985. Producción de biomasa de poró gigante (*Erythrina poeppigiana*) y king grass (*Pennisetum purpureum* x *P. typhoides*) intercalados en función de la densidad de siembra y frecuencia de poda de poró. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 96 p.
141. ROSWALL, T. (ed.). 1980. Nitrogen cycling in Westafrican ecosystems. s.l., SCOPE/UNEP/MAP/IITA. 450 p.

142. RUNDELL, P.W. *et al.* 1982. Seasonal dynamics of nitrogen cycling for a Prosopis woodland forest in the Sonoran desert. *Plant and Soil (Holanda)* 67:343-353.
143. RUSSO, R.O.; BUDOWSKI, G. 1986. Effect of pollarding frequency on biomass of Erythrina poeppigiana as a coffee shade tree. *Agroforestry Systems (Holanda)* 4(2):145-162.
144. SALAS, G. DE LAS. 1987. Ecosistemas forestales, con especial énfasis en América Latina. IICA. Serie de Libros y Materiales de Enseñanza no. 80. 447 p.
145. SANCHEZ, P.A. 1981. Suelos del trópico, características y manejo. IICA. Serie de Libros y Materiales Educativos no. 48. 660 p.
146. _____. 1987. Soil productivity and sustainability of agroforestry systems. *In* Stepler, H.A.; Nair, P.K.R. *Agroforestry, a decade of development.* Nairobi, Kenia, ICRAF. 335 p.
147. SANTANA, M.B.M.; CABALA, R.P. 1982. Dynamics of nitrogen in a shaded cacao plantation. *Plant and Soil (Holanda)* 67:271-281.
148. _____. 1984. Reciclagem de nutrientes en una plantacao de cacao sombreada com Erythrina. *In* International Cocoa Research Conference (9., 1984, Togo). *Proceedings.* Lagos, Nigeria, Cocoa Producers Alliance. p. 205-210.
149. SIBAND, P. 1974. Evolution de caracteres et de fertilité d'un sol rouge de la Casamance. *Agronomie Tropicale (Francia)* 12:1228-1248.
150. SOMARRIBA, E.; BEER, J.W. 1987. Dimensions, volumes and growth of Cordia alliodora in agroforestry systems. *Forestry Ecology and Management (Holanda)* 18: 113-126.
151. SUAREZ DE CASTRO, F. *et al.* 1961. Efecto del sombrero en los primeros años de vida de un cafetal. *Café (Col.)* 3(10):81-102.
152. _____.; RODRIGUEZ, C.A. 1962. Equilibrio de materia orgánica en plantaciones de café. *In* Investigaciones sobre la erosión y la conservación de los suelos en Colombia. s.l., Col., Federación Nacional de Cafetaleros de Colombia. p. 331-372.

153. STARK, N.M. 1971. Nutrient cycling. I. Nutrient distribution in some Amazon soils. II. Nutrient distribution in Amazonian vegetation. *Tropical Ecology (India)* 12:24-50, 177-201.
154. STEPPLER, N.; NAIR, P.K.R. 1978. *Agroforestry, a decade of development*. Nairobi, Kenia, ICRAF. 335 p.
155. SZOTT, L.T. et al. 1988. Agroforestry systems for acid soils in the humid tropics. s.n.t. Presented of American Soc. of Agronomy Annual Meeting. American, Ca. (Sin publicar).
156. SYLVAIN, P.G. 1952. Effect of shade upon growth and differentiation of coffee seedings as expressed by physical measurements and chemical composition. Turrialba, C.R., IICA. s.p.
157. TANNER, E.V.J. 1977. Four montain rain forests of Jamaica: a quantitative characterization. *Journal of Ecology (G.B.)* 65:883-896.
158. _____. 1980. Litterfall in montane rain forest of Jamaica and its relation to climate. *Journal of Ecology (G.B.)* 68:833-848.
159. _____. 1981. The decomposition of the leaf litter in Jamaican forest. *Journal of Ecology (G.B.)* 69:263-275.
160. THONG, K.C.; NG, W.L. 1978. Growth and nutrient composition of crop cocoa plants on inland Malaysian soils. In International Conference on Cocoa and Coconuts (Kuala Lumpur, Malaysia). s.n.t. 25 p.
161. TOKY, O.P.; KUMAR, P.; KHOSLA, P.K. 1989. Structure and function of traditional agroforestry systems in the Western Himalaya. I. Biomass and productivity. *Agroforestry Systems (Holanda)* 9:47-70.
162. _____.; KUMAR, P.; KHOSLA, P.K. 1989. Structure and function of traditional agroforestry systems in Western Himalaya. II. Nutrient cycling. *Agroforestry Systems (Holanda)* 9:71-89.
163. TOLEDO, J.; SERRAO, E.A. 1982. Producción de pastos y ganado en la Amazonia. In Amazonia, investigación sobre agricultura y uso de la tierra. Ed. por S.B. Hecht. Cali, Col., CIAT. p. 295-324.

164. TSCHINKEL, H. 1972. Growth, site factors and nutritional status of Cupressus lusitanica plantation in the high land of Colombia. Tesis doctoral. s.l., Alemania, R.F., Universidad de Hamburgo. 165 p.
165. UNESCO. 1978. Tropical rain forest ecosystems. Paris, Francia. s.p.
166. YODA, K. 1968. A preliminary survey of the forest vegetation of Eastern Nepal. III. Plant biomass in the sample plots chosen from different vegetation zones. J. College Arts Sci., Chiba, Univ. Nat. Sci. Ser. 5:277-302.
167. YOUNG, A. 1987. Soil productivity, soil conservation and land evaluation. Agroforestry Systems (Holanda) 5:277-292.
168. _____. 1989. Ten hypotheses for soil-agroforestry research. Agroforestry Today (Kenia) 1:13-16.
169. _____. 1989. Agroforestry for soil conservation. CAB-International /ICRAF. Science and Practice of Agroforestry no. 4. 276 p.
170. _____. (ed.). 1989. Research into soil management and agroforestry (1989, Nairobi, Kenia). Report on an ISSRAM/ICRAF Workshop. Nairobi, Kenia, ICRAF. 28 p.

CAPITULO QUINTO

CICLO DEL NITROGENO

5.1. El nitrógeno en el suelo

5.1.1. Contenido de N en el suelo

El N es uno de los elementos esenciales en la nutrición de las plantas y ha sido objeto de estudios y publicaciones específicas (15, 23, 37, 39, 96, 98, 110). Está asociado en forma directa al C, en función de la relación C/N. Esta relación en condiciones de suelo normal tiene un valor entre 10 y 20; en casos extremos puede llegar a 30. En suelos con alto contenido de materia orgánica, naturalmente se tiene alto contenido de N. Un suelo con un contenido de materia orgánica mayor del 4 % puede ser clasificado como un suelo altamente húmico. Si se tiene una relación $C/N = 10$, lógicamente el contenido de N es 0,4 % lo cual implica que se tiene un suelo con alto contenido de N (37, 39).

El contenido de materia orgánica y N está relacionado con el origen de los suelos. Así los suelos de las regiones bajas en su mayoría tienen un contenido de N de mediano a bajo. En tanto, los suelos derivados de cenizas volcánicas se caracterizan por tener valores altos de N. Por ejemplo, en suelos de origen volcánico en América Central; en el horizonte A, se tienen valores de 0,4 % a 0,5 % de N (26; ver Cuadro 4.1).

El contenido de N en el suelo se relaciona con el desarrollo y evolución a largo plazo de las rocas parentales. Las rocas originales que constituyen la corteza terrestre son rocas ígneas, formadas por la erupción de volcanes a partir del núcleo interno de la tierra. En el momento en que estos materiales llegan a la superficie con temperaturas de más de 2000 °C, se volatiliza el N por su alta inestabilidad. En realidad, temperaturas de 500 °C son suficientes para volatilizar el N.

En el proceso de evolución de la tierra, especialmente en la época precámbrica, las constantes erupciones permitieron una gran acumulación de N en la atmósfera. Así el contenido de N el aire es en promedio del 78 %.

5.1.2. Formas del N en el suelo

Entre el 95 y el 98 % del N-total del suelo está asociado a sustancias orgánicas, el resto es anorgánico. Existen diferentes sustancias nitrogenadas importantes en los tejidos vegetales.

El grupo de los aminoácidos se forma de la amonificación de los ácidos que resultan en el ciclo del ácido cítrico en el proceso de la asimilación de las plantas. Se conocen 20 aminoácidos esenciales, los que se polimerizan para formar oligopéptidos, péptidos, proteínas y ácidos proteínicos (ver sección 4.1.2).

En el grupo de azúcares aminados, radicales aminos están ligados a carbohidratos. Estos grupos amínicos de proteínas y azúcares aminados son muy favorables, porque en el momento de la mineralización de la materia orgánica se hidroliza el enlace entre el carbono y el nitrógeno, liberándose NH_4^+ ; que constituye el primer producto de la mineralización de las sustancias orgánicas de la planta.

Existen otras formas orgánicas, especialmente relacionadas con productos aromáticos heterocíclicos. Así se tiene una serie de compuestos como el indol, triptofano, piridina, quinolina, melanina, etc., donde el N forma parte de una cadena cíclica con una ligazón muy fuerte de N a la cadena. Los microorganismos del suelo no pueden romper estas ligaduras, así se tienen entonces, sustancias nitrogenadas no mineralizables que aparecen dentro del ciclo del N en la naturaleza (37, 110; ver sección 4.1.2).

5.1.3. Ciclo del N en la naturaleza, con énfasis en el suelo

El NH_4^+ en el suelo está sujeto a un proceso de transformación llamado desnitrificación, pasando de NH_4^+ a NO_2^- y a NO_3^- . Este ciclo está a cargo de una serie de bacterias llamadas Nitrosomas y Nitrobacter. El proceso de transformación de NO_2^- a NO_3^- es rápido, donde las bacterias Nitrobacter presentan una notable avidez por el NO_2^- , para luego transformarlo a NO_3^- . Este proceso es muy favorable debido a que los NO_2^- son tóxicos para la planta (37, 110; ver Figura 5.1).

Existen en el suelo microorganismos que presentan un ciclo interno de N, inmovilizan el NO_3^- , para formar nuevamente sustancias orgánicas nitrogenadas. Las reservas de N orgánico alcanzan del 95 al 98% de N en el suelo, de ellos paulatinamente se forman NH_4^+ y NO_3^- , formas inorgánicas del suelo, que son absorbidas por las plantas.

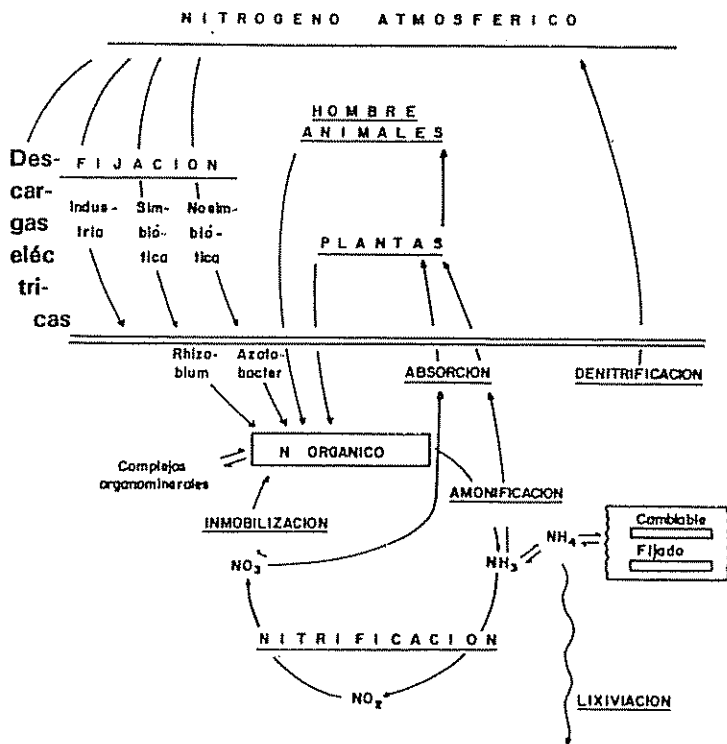


Figura 5.1. Representación esquemática del ciclo del nitrógeno en la naturaleza (según Stevenson, 110; adaptado de Fassbender y Bornemisza, 37).

plantas presentan características genéticas de selectividad para la absorción de NO_3^- y NH_4^+ , aunque la mayoría de las especies son capaces de absorber ambas formas. Después de la absorción en la planta, se forman nuevamente sustancias orgánicas nitrogenadas, cerrándose prácticamente el ciclo suelo-planta. La absorción de NO_3^- implica que en la planta se tiene que reducir a NH_4^+ para poder ser utilizada en la formación de proteínas.

El NO_3^- y el NH_4^+ son compuestos que tienen una determinada carga electrostática. El NH_4^+ tiene una carga positiva y el NO_3^- una carga negativa. En el suelo se presenta una interacción entre un catión (NH_4^+) y los cambiadores del suelo que son las arcillas, las sustancias húmicas, los óxidos de Fe y Al, que tienen cargas positivas, formándose una fase de NH_4^+ cambiabile, hasta cierto punto disponible para las plantas.

En el suelo existe un equilibrio químico entre el NH_4^+ y el complejo de intercambio. En el momento en que la planta absorbe NH_4^+ , se libera del complejo coloidal NH_4^+ para compensar la pérdida debida a la absorción, existiendo de esta manera una disponibilidad continua de NH_4^+ . Por otro lado, el NH_4^+ puede ser lixiviado perdiéndose en el agua.

El NO_3^- puede ser también absorbido en las superficies coloidales, siempre y cuando se tengan cargas positivas que atraigan a las negativas del NO_3^- .

La formación de las reservas de NO_3^- y NH_4^+ es altamente dependiente del pH. Con valores bajos de pH se generan cargas electropositivas donde se absorben los NO_3^- . Existe un punto en el cual las cargas positivas y negativas de los complejos de intercambio desaparecen, presentándose entonces coagulación con un rápido lavado de los NO_3^- a través del perfil del suelo, perdiéndose así el N.

Existen en la naturaleza procesos de fijación del N que se producen en función de diferentes fenómenos. Así, se tiene una acumulación del N atmosférico en el suelo en función de las descargas eléctricas, que es el proceso que a largo plazo ha contribuido más a la acumulación del N en los suelos y en los ecosistemas. Durante las tormentas, los rayos que tienen temperaturas y valores de energía muy altos, llevan a la oxidación del N_2 de la atmósfera formándose los primeros óxidos que aparecen en el aire. Estos óxidos, de la forma N_2O_5 , reaccionan paulatinamente con el agua para formar el ácido nítrico (HNO_3). Con las aguas de lluvias se depositan determinadas cantidades de N en el suelo.

A nivel mundial, este proceso, durante millones de años ha estado participando en la acumulación de N en el suelo. La intensidad de esta acumulación depende del número de días de tormenta al año. En lugares con más de 200 días por año, además de otros factores de tormenta al año se tiene una alta acumulación de N en el suelo.

En Zambia, Africa, se han realizado determinaciones específicas de la deposición de N por las lluvias en función de la intensidad de las tormentas. Se ha demostrado que en las áreas costeras se tienen valores de $42 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. Estos valores disminuyen notablemente tierra adentro en los continentes, llegando a 10 y 15 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. En forma general, se tiene una acumulación de N en el suelo por las lluvias de 10 a 20 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, que representa una parte de las necesidades de las plantas (ver Cuadro 3.4).

La fijación simbiótica y no simbiótica, procesos realizados por los microorganismos distribuidos en las capas del suelo, son procesos también muy importantes en la naturaleza. La fijación simbiótica está relacionada con un grupo de bacterias, Rhizobium, existen como 20 cepas relacionadas con determinados grupos de leguminosas. El proceso es bioquímicamente complicado. En general se tiene una simbiosis, en la cual las bacterias se introducen y se multiplican en los tejidos de las raíces de las plantas hospederas, que están ofreciendo todo lo necesario a los microorganismos, inclusive N en una primera fase. A partir de un punto, las bacterias Rhizobium empiezan a fijar N en forma de aminoácidos, el ácido glutámico. En función de esto, cuando las bacterias van muriéndose se cede este ácido glutámico a la planta, que lo traslada a la parte aérea.

Las cantidades de N fijadas en el proceso simbiótico son muy discrepantes en lo que respecta a la información obtenida. Existen valores entre 20 y 1000 kg de N.ha⁻¹ de fijación en un ciclo de producción (27, 37, 110) sin embargo los valores mayores que 100 kg.ha⁻¹.a⁻¹ son dudosos.

La fijación no simbiótica, por otra parte, implica la existencia de microorganismos que sin una simbiosis presentan características de fijación. Por ejemplo las bacterias Azotobacter libres que existen en el suelo y que tienen la capacidad de fijar N, pero, las cantidades fijadas son pequeñas (5-10 kg.ha⁻¹.a⁻¹). Existen también algunas especies de algas azules y verdes, y otras especies de bacterias asociadas con determinados pastos, donde existe una situación favorable tanto para el pasto como para la bacteria, que involucra la fijación de una determinada cantidad de N (27).

La actividad industrial y humana involucra una utilización alta de combustibles fósiles, que mediante la quema produce una alta liberación no solo de N, sino también de S al aire en forma de SO₂. Con esta acumulación se cubren generalmente las necesidades de S de las plantas, pero llevan a problemas de acidificación de los suelos.

El proceso de desnitrificación puede ser biológico o abiológico. En el primer caso se tiene la participación de determinados microorganismos, Bacterium demitrificans, se pierde N hacia la atmósfera. Las condiciones de inundación biológica depende de las características intrínsecas de los microorganismos como tales, de las poblaciones que existen, de las características del suelo, de la disponibilidad de nutrientes, agua y aire, de las condiciones de pH, etc.

La denitrificación abiológica se presenta cuando existen condiciones muy específicas para determinadas reacciones químicas dentro de los diferentes grupos nitrogenados. En función de estas reacciones se pierde N hacia la atmósfera. Sin embargo no se conocen datos al respecto pero se suponen valores bajos.

5.2. El nitrógeno en ecosistemas naturales

5.2.1. Ciclos bioquímicos, geoquímicos y biogeoquímicos

Las bases necesarias para describir los ciclos de los elementos nutritivos en ecosistemas ha sido presentada en la sección 1.3. (detalladamente en 1.3.3.). Algunos autores han diferenciado más aún distintos tipos de ciclos para los elementos nutritivos:

- Ciclos bioquímicos, aquellos en que la circulación de los elementos nutritivos está relacionada con la biomasa presente. Comprende los procesos de absorción, acumulación, translocación y redistribución interna de elementos nutritivos en las plantas.
- Ciclos geoquímicos, son aquellos que ligan componentes bióticos a los abióticos del sistema, especialmente con el medio ambiente; comprenden los procesos de intercambio de los elementos químicos con la atmósfera (ganancias y pérdidas) y el suelo (residuos vegetales y su descomposición, meteorización, escorrenfa, lixiviación).
- Ciclos biogeoquímicos, comprenden la totalidad del ciclo, o sea la circulación de elementos químicos entre la biomasa, el mantillo, el suelo y las fuentes externas del ecosistema (rocas, atmósfera).

El estudio del ciclo biogeoquímico del nitrógeno ha sido objeto de numerosos estudios específicos (entre otros ver 37, 45, 74, 90, 96, 98, 110).

5.2.2. Acumulación de nitrógeno en ecosistemas

Para calcular las cantidades de nitrógeno total acumuladas en los diferentes compartimentos de un ecosistema es necesario conocer las reservas de materia orgánica y el contenido de nitrógeno correspondiente. Algunos detalles de las concentraciones de N en

diferentes compartimentos del ecosistema de San Eusebio, Venezuela (52) se pueden observar en el Cuadro 4.3. La acumulación de N varía notablemente en los tejidos vegetales; en el estudio antes mencionado se encontraron para hojas, ramas y tallos respectivamente 16,4; 3,6 y 2,0 g N.kg⁻¹ materia seca. En la mayor parte de los ecosistemas de los cuales se tiene información, el contenido de N oscila entre 10 y 20 g N.kg⁻¹ de materia seca (52, 56, 74, 82), en casos excepcionales se han encontrado valores de 22 g.kg⁻¹ (Manaos, Brasil, 74). De acuerdo con Klinge (82), los contenidos de elementos nutritivos en los compartimentos de la fitomasa representan las condiciones edafológicas de los sitios de estudio. Según Jordan (74) existen mecanismos especializados de conservación y acumulación de elementos nutritivos tanto para las raíces como para las hojas.

Para el cálculo del N-total en el suelo se multiplica el peso del horizonte o segmento del suelo por su contenido de N correspondiente.

Tanto las cantidades de N en la vegetación como las cantidades en el suelo varían, a grandes rasgos, en los ecosistemas estudiados. (Cuadro 5.1). Las reservas en la vegetación generalmente oscilan entre 1000 y 2000 kg N.ha⁻¹, con valores menores excepcionales de los trabajos en Jamaica (112, 113), llanuras del Magdalena (42, 43) y San Carlos de Río Negro en Venezuela (56, 70, 71) y valores más altos en Manaos, Brasil (78, 80, 82).

El contenido en la biomasa aérea es generalmente mayor que en las raíces. En el caso del ecosistema de San Carlos de Río Negro, en Venezuela, bajo "Caatinga" se encontró que las raíces contienen más N que la vegetación aérea. Las reservas en la capa de mantillo no pasan generalmente del 10% de las reservas en la vegetación.

El mayor ámbito de amplitud lo presenta sin embargo el suelo, donde se han registrado valores entre 1000 y 12000 kg.ha⁻¹; aquí no solo se observan las variaciones entre los lugares de estudio sino también la diferencia entre los diferentes estudios con respecto a las profundidades analizadas en los suelos. Las cantidades acumuladas en la vegetación generalmente representan entre el 10 y 20% de las cantidades encontradas en el suelo; sin embargo en los ecosistemas de Manaos (78, 79), Caatinga de San Carlos y en Kade (51) las relaciones son inversas, aquí se observa que la materia orgánica se ha acumulado sobre el suelo y por ello resulta un ecosistema bastante inestable.

En función de la relación C/N de la materia orgánica se presenta un paralelismo entre las reservas de la materia orgánica y el nitrógeno en los ecosistemas estudiados. Así los aspectos discutidos

anteriormente sobre la materia orgánica son aplicables al nitrógeno. Por otro lado es necesario mencionar la fijación del nitrógeno en la litosfera (56) y en nódulos de especies leguminosas, así Odum y Pigeon (93), Jordan y Herrera (70, 71) y Rundel *et al* (101) han determinado las cantidades de N fijadas simbióticamente en los ecosistemas. En el caso del ecosistema de San Eusebio, indican Grimm y Fassbender (34, 52), el género Podocarpus forma nódulos en las raíces, pero no se conoce la tasa de fijación.

En la literatura sólo se han encontrado tres ejemplos de estudios del ciclo de N en ecosistemas secos estacionales (Cuadro 5.1). El ecosistema High Bush de Yucatán, Belice, es un bosque mixto de árboles de madera dura con predominancia de Guazuma ulmifolia (6). El ecosistema Cohume Ridge se caracteriza por la predominancia de Orbignya cohune (Arnason y Lambert, 6). Los estudios de la dinámica estacional de un bosque de Prosopis spp. fueron conducidos por un grupo de la Universidad de California (Rundell *et al*, 101); esta especie es muy típica de zonas secas de América Latina.

El ciclo de nitrógeno de estas comunidades se caracteriza por las cantidades limitadas de nitrógeno en la vegetación (número de individuos por hectárea) y su acumulación en el suelo, especialmente bajo la capa de árboles leguminosos.

5.2.3. Transferencia del nitrógeno en los ecosistemas

Los procesos de transferencia de N dentro del ecosistema se basan en la producción de residuos y su descomposición (mineralización y humificación) y el paso del nitrógeno con el agua a través del mismo (Cuadro 5.1).

El contenido de N en los residuos es comparable al contenido en los tejidos originales, ya que la reabsorción dentro de las plantas es muy pequeña. Así, conociendo las cantidades de hojarasca y su contenido de N, se puede calcular la transferencia correspondiente, cuyas tasas son muy variables, oscilando entre 28 y 240 kg.ha⁻¹.a⁻¹.

Para determinar las transferencias con el agua es prácticamente necesario hacer un estudio del ciclo hidrológico de los ecosistemas (ver Capítulo 3.3). El agua de lluvia que ingresa al ecosistema depende del régimen de lluvias; una parte de éstas es retenida por las hojas (intercepción) y el resto se escurre de las hojas (escurrimiento foliar) o a lo largo de los tallos, pasando a la capa de mantillo del suelo. Estos

Cuadro 5.1. Reservas y transferencias de N en ecosistemas forestales tropicales (según diferentes autores).

		RESERVAS kg.ha ⁻¹					TRANSFERENCIAS kg.ha ⁻¹ .a ⁻¹							
		FITOMASA		Mantillo	Suelo (cm)	Total	Veget. suelo	Lluvia	Lluvia veget. (años)	Esc. Foliar	Residuos veget.	Fijación	Percolación	"Turn-over"
Area	Rafca													
Ecosistemas Montanos Pluviosos														
San Eusebio Venezuela	Fassbender Grimm Grimm Fassbender (33, 34, 52, 53)	928	231	583	9984 (40)	11726	0,15	9,9	176,0	8,6	182,0	--	5,1	184,0
Blue Forests														
Jamaica	Tanner (112, 113, 114)	426	--	--	9000 (45)	9426	0,22	--	--	--	--	--	--	--
	Mull	857	--	--	7000 (45)	7857	0,11	--	--	--	--	--	--	--
El Verde														
Puerto Rico	Odum Pigeon (93)	1021	27	130	4600 (309)	5778	0,23	10,00	117,00	70,00	160,00	88,00	30,00	220,00
Kerigoma														
Papua	Edwards Grubb (28, 29)	1277	163	150	6050 (25)	7840	0,26	--	--	--	--	--	--	--
Ecosistemas de Llanura Pluviosos														
Manaus Brasil	Klinge Klinge, Rodriguez (78, 79)	2645	588	77	1421 (30)	4704	2,30	6,00	547,00	--	--	--	5,00	--
Maldonado														
Llanura Colombia	Fóster et al (43, 44)	741	--	672	5350 (50)	6763	0,26	--	--	--	--	--	--	--
		1011	--	650	4828	6489	0,38	--	--	--	--	--	--	--
Kabo Surinam	Ohlert (95)	1579	560	321	3801 (50)	8121	--	--	--	--	--	--	--	--
Rio Negro														
Carina Venezuela	Jordan et al Herrera Jordan (56, 70, 71)	436	834	132	785 (50)	2087	1,68	21,00	62,00	9,0	28,00	--	13,00	16,00
Terrafino		1084	586	408	3507	5583	0,49	12,00	173,00	25,0	61,00	18,00	14,00	26,00
Llanos Occident.														
Venezuela	Hase Fólster (54)	1894	--	137	3934 (50)	6055	--	--	--	--	--	--	--	--
Kade, Ghana														
Greenland Greenland Nye (51)		1788	214	35	1533 (30)	3670	1,34	15,00	142,00	12,0	240,00	--	--	237,00
Banco, Talweg														
Costa Marfil	B. Reversat (13, 14)	1400	--	--	5800	7200	0,24	21,00	68,00	60,0	158,00	--	--	220,00
Yapo		1000	--	--	2600	3600	0,38	21,00	--	13,0	118,00	--	--	130,00
Ecosistemas de Llanura Secas Estacionales														
Cobruite Ridos														
Belice	Arnason Lambert (6)	690	--	480	7000	8670	0,13	--	--	--	--	--	--	--
		203	--	65	13150	13415	0,02	--	--	--	--	--	--	--
Sonora														
California USA	Rundell et al (101)	54,6	--	17,4	4090	4162	0,02 (60)	0,12	535,00	--	46,8	56,0	1,3	--

procesos se pueden medir fácilmente con pluviómetros. La determinación del contenido del agua en el suelo y sus cambios, especialmente la toma de muestras del agua para los análisis químicos correspondientes, solo son posibles con técnicas especializadas (tensiómetros, placas lisimétricas, balance climático).

Mientras que los datos del aporte de N con las aguas de lluvia en los ecosistemas son más o menos frecuentes, la información del escurrimiento foliar y de los tallos es muy somera y más aún los datos sobre las pérdidas con las aguas freáticas; los datos aquí generados se basan en mediciones muy divergentes entre ellas (Cuadro 3.3; 3.4).

Las tasas de ingreso de elementos químicos en el ecosistema dependen de manera especial de las condiciones ambientales de la región en estudio y de la contaminación atmosférica. Al pasar el agua a través de la vegetación se produce generalmente un aumento en la concentración de los elementos, en función del lavado del polvo y el rocío de las superficies foliares y generalmente en el pasaje a través del suelo se produce una absorción en el complejo coloidal del mismo. En los pocos casos en donde se pueden comparar los datos de ganancia y pérdida en el ecosistema del agua se observa una acumulación pequeña pero constante de este.

5.2.4. Modelos de ciclos del N

A manera de ejemplo se presenta en la Figura 5.2 el modelo del nitrógeno para el ecosistema de San Eusebio, Venezuela, de acuerdo con los datos obtenidos por Fassbender y Grimm (34, 35) y Grimm y Fassbender (52, 53).

En el estudio realizado se considera como límite superior del ecosistema la superficie de los árboles más altos del rodal, determinándose así, la superficie de los ingresos atmosféricos en el ecosistema. Aquí se encuentra una equivalencia con otros estudios. Como límite inferior del ecosistema se considera la profundidad de raíces observadas, distribuidas intensivamente hasta 40 cm y extensivamente hasta los 120 cm. Este límite importante para determinar los egresos del ecosistema difiere mucho entre los diversos estudios realizados, dependiendo de las metas de los mismos, de la estructura del suelo, la distribución de raíces, etc.; algunos autores incluso analizan los egresos del suelo no directamente dentro del ecosistema sino en las cuencas hidrográficas respectivas. Los límites laterales del ecosistema no están definidos, ya que se supone que el transporte lateral se compensa con ingresos y egresos laterales equiparables.

Como compartimentos del ecosistema se consideran el bosque o la vegetación, la capa de mantillo y el suelo mineral. La decisión de los límites de estos dos últimos no es problemática; en la capa de mantillo se observan en forma clara los horizontes de los residuos recientes (L), en descomposición (F) y transformados en materiales húmicos (H); en el suelo mineral se consideran todos los componentes de la vegetación, aunque aquí se pueden también diferenciar compartimentos más detallados (52). Como un compartimento sui generis para el ecosistema estudiado se considera la madera muerta por su abundancia, además entre el momento de la muerte de los árboles y su proceso de descomposición no existen límites definidos.

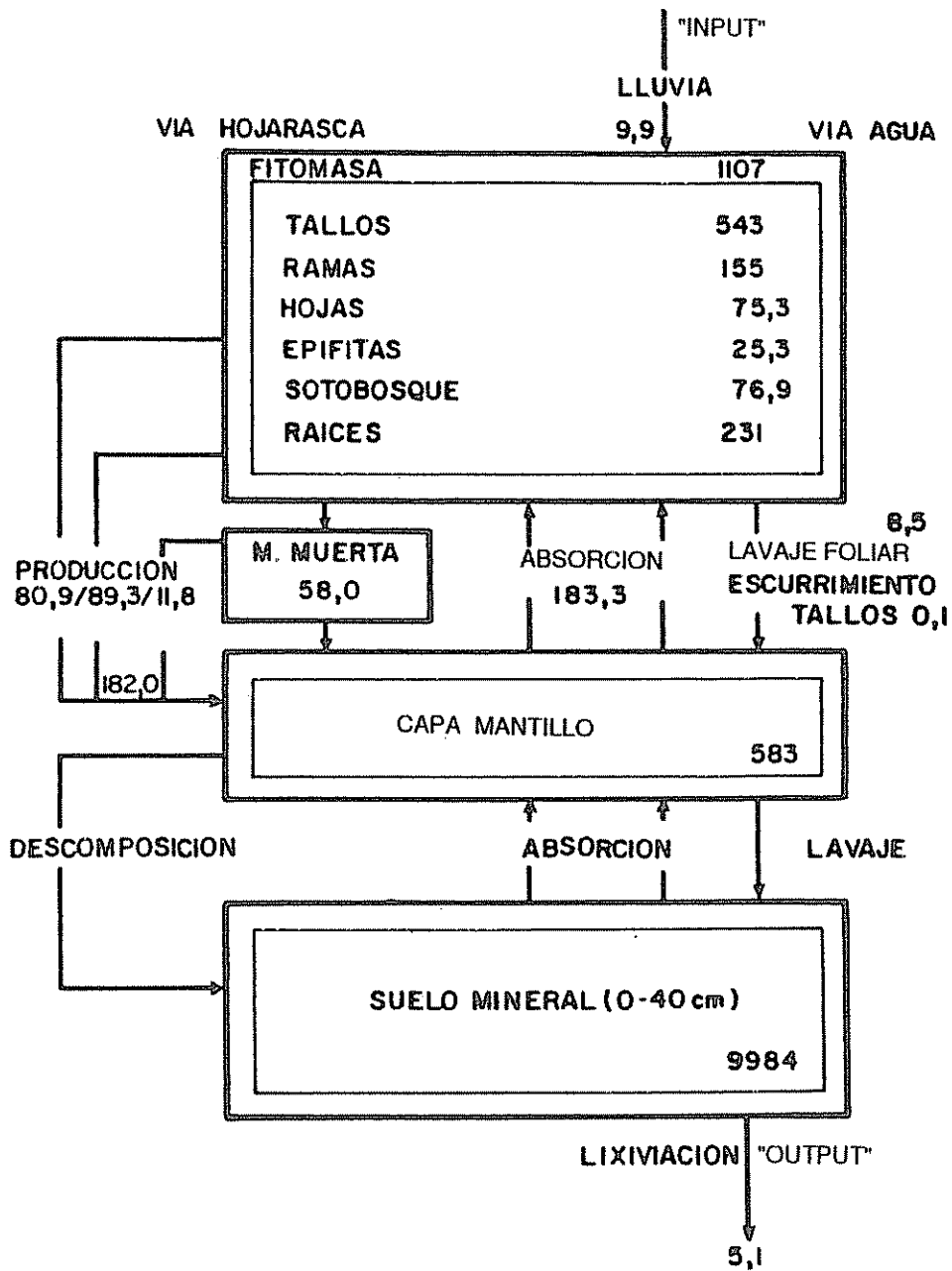


Figura 5.2. Ciclo del N en el ecosistema de San Eusebio, Venezuela (reservas Kg.ha^{-1} , transferencias $\text{kg.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$; según Fassbender y Grimm, 34).

Los componentes dinámicos del ecosistema están unidos a los medios de transporte de los elementos químicos. En la parte izquierda (Figura 5.2) del modelo se consideran los procesos de transferencia con los residuos vegetales; en la derecha, las transferencias con el agua. En el modelo no se consideran transportes de materiales sólidos (polvos, materiales de erosión) ya que ellos son trasladados y medidos con el agua. No se midieron transportes de gases, sólo en el caso del N se suponen fuentes de ganancia o pérdida en esta forma.

Los procesos de crecimiento y retención de elementos químicos en el ecosistema tampoco se estudiaron en detalle, pues se considera que el bosque se encuentra en su estado de clímax ("steady state"); esta simplificación es válida en función del bosque primario senil encontrado; esta decisión ahorra, por otro lado, las mediciones complicadas y a corto plazo inexactas, del desarrollo del rodal, la flora edáfica y especialmente, de las raíces finas en el suelo.

Una limitación notable en el estudio realizado es la falta de la cuantificación de los elementos químicos y los procesos de transporte con la macro y microfauna del ecosistema. Estos aspectos han sido hasta ahora poco estudiados (49, 93); una integración total de los aspectos por estudiar es difícil y casi imposible.

Como fuente de ganancia ("input") se considera el agua de lluvia ($9,9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) y como fuente de pérdida ("output") la filtración del agua freática ($5,1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$); aunque los rodales se encuentran en pendiente, los movimientos laterales de ganancia y pérdida se han considerado equiparables. Por tanto, con la acumulación de $4,8 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ y con las posibles ganancias por la fijación simbiótica, se han acumulado a largo plazo reservas de N que se encuentran distribuidas en los diferentes compartimentos del ecosistema. Del total de $11732 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ se encontraron respectivamente 9,6 y 85% en la vegetación, mantillo (incluye madera muerta) y suelo mineral (0-40 cm). De esta distribución resulta una estabilidad grande del ecosistema, la acumulación en las capas del mantillo y en la vegetación equivale a la deposición con las lluvias en 176 años.

La producción de residuos alcanzó $182 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ pero la tasa de su descomposición no es conocida. La absorción por el bosque ("turnover") se puede calcular con base en las ganancias y pérdidas de este compartimento, resultando en $183 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. Esta necesidad de N por el rodal es bastante alta en comparación con cultivos agrícolas pero explicable en función del ciclo interno de este elemento en el ecosistema. A excepción de los ecosistemas de San Carlos de Río

Negro (Jordan *et al*, 70, Herrera y Jordan, 57) se ha encontrado en otros ecosistemas tropicales una tasa de absorción comparable a la de San Eusebio.

5.2.5. Parámetros de cuantificación del ciclo del N en ecosistemas

Para la cuantificación de la dinámica y los procesos de cambio en los ecosistemas se han descrito en la literatura diferentes parámetros o relaciones matemáticas.

- Índice de transformación en la vegetación ("vegetation turnover"), definido matemáticamente como la diferencia entre ingresos y egresos en el compartimento de la vegetación del ecosistema, expresada como masa en unidad de superficie y de tiempo ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$). Las fuentes de ingreso o ganancia son las lluvias, deposición de partículas, la fijación de N en raíces y hojas. Las fuentes de pérdidas o egreso son la producción de residuos vegetales aéreos y radicales, la producción de madera muerta, el escurrimiento de los tallos y las hojas. Este parámetro es prácticamente equiparable a la absorción de elementos por la vegetación, suponiendo que el ecosistema se encuentra en su estado de clímax, donde la producción es igual a la descomposición.

Los valores encontrados se encuentran en detalle en el Cuadro 5.2. Por ser la vegetación un sistema cerrado dentro del ecosistema, debe compensarse la diferencia entre las ganancias y pérdidas a través de la absorción de elementos químicos estudiados, a excepción del nitrógeno. Como fuentes adicionales de ingreso de N en la vegetación deben considerarse la fijación de N en las raíces y hojas; estos procesos no fueron estudiados en detalle; sin embargo, vale indicar que dentro de las especies encontradas no existen leguminosas y por otro lado otros autores han demostrado que en los nódulos radicales encontrados en el pino laso (*Podocarpus resigülosii*) no se produce fijación de N.

Los elementos N, K y Ca alcanzaron valores altos de "turnover", y para P, se encontraron los valores más bajos. Las tendencias encontradas generalmente se han constatado en otros ecosistemas, cuyos valores, sin embargo, no son siempre equivalentes, ya que el estudio de los procesos difiere en su grado de intensidad y casi no se conocen datos sobre la producción de madera muerta y residuos radicales. Además,

Cuadro 5.2. Ingreso y egreso de elementos químicos en el compartimento de la vegetación y su "turnover" ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) (según Fassbender y Grimm, 34).

	N	P	K	Ca
San Eusebio				
Ingresos				
Lluvia	9,9	1,1	2,6	5,6
Egresos				
Residuos vegetales aéreos	69,1	3,99	33,1	43,1
Raíces	89,3	5,36	33,0	61,3
Madera muerta	11,8	0,72	5,8	17,5
Escurrecimiento foliar	8,5	1,38	69,7	6,9
Escurrecimiento de tallos	0,1	0,02	1,0	0,1
Suma	178,8	11,47	142,6	128,9
"Turnover"	168,9	10,37	140,0	123,3
El Verde, Pto. Rico (93)				
Sta.Fe, Panamá (49)	---	9,0	---	251,0
Costa Marfil (13, 14)				
Kade (51)	235	13,6	278,0	298,0

los valores del egreso con el agua se han obtenido con diferentes métodos. Los valores de los estudios en Sta. Fe, Panamá (49) y El Verde en Puerto Rico (93), así como en la Costa de Marfil (13, 14) y Ghana (51) se han incluido en el Cuadro 5.2. La tendencia de la movilidad de los elementos químicos se puede generalizar con un grado de renovación alto para el N (170 a 235 kg.ha⁻¹.a⁻¹), medio para K, Ca y Mg y bajo para el P (10 a 14 kg.ha⁻¹.a⁻¹).

Indice de ingreso - egreso del ecosistema ("ecosystem input - output ratio"), definido matemáticamente como el coeficiente entre la ganancia y pérdida de un elemento en el ecosistema:

$$\frac{\text{ingreso (kg.ha}^{-1}\text{.a}^{-1}\text{)}}{\text{egreso (kg.ha}^{-1}\text{.a}^{-1}\text{)}}$$

Valores > 1 implican una ganancia, valores < 1 implican una pérdida. Para la evaluación de este parámetro es necesario, a la vez, evaluar todas las fuentes de ingreso o ganancia (lluvia, deposición, fijación de N, meteorización de las rocas parentales de los suelos) y de egreso o pérdida (percolación, escurrimiento, volatilización, erosión, cosecha) del ecosistema.

Los valores encontrados en este estudio en San Eusebio se han resumido comparativamente con los de Sta. Fe, Panamá, y El Verde, Puerto Rico (49, 93) en el Cuadro 5.3. Por ser en San Eusebio los ingresos con las lluvias siempre más altos que los egresos, con el agua de percolación resultan valores del coeficiente > 1; ello implica que se produce siempre una ganancia o acumulación de los elementos químicos en el ecosistema. Para los elementos estudiados en los otros ecosistemas se ha encontrado generalmente una pérdida en el ecosistema, a excepción del Mg en El Verde (43) y P, Mn en Sta. Fe (49). En este caso debe suponerse una compensación de las pérdidas con la meteorización paulatina de las rocas parentales de los suelos, sin embargo, éste es un proceso cuya cuantificación es casi imposible, especialmente en períodos relativamente cortos.

Los valores netos de ganancia anual de los elementos químicos se pueden calcular con base en los datos del Cuadro 5.3. Para el N se encontró una acumulación anual de 4,0 kg.ha⁻¹.a⁻¹; como fuente de producción de N en la atmósfera se consideran las tormentas y la quema de gases excesivos en la extracción del petróleo en la región del lago Maracaibo (53).

Cuadro 5.3. Ingreso y egreso de elementos químicos en el ecosistema (kg.ha⁻¹.a⁻¹) y relación entre ingreso y reservas en la vegetación (años) (según Fassbender y Grimm, 53).

	N	P	K	Ca	Mg
San Eusebio					
Ingreso	9,1	1,1	2,6	5,56	5,20
Egreso	5,1	0,26	2,2	1,60	0,60
Relación	1,78	4,23	1,18	3,48	8,67
El Verde (93)	0,30	0,72	---	0,77	1,45
Sta. Fe (49)	---	1,43	1,02	0,18	0,11
Relación reserva vegetal-ingreso					
San Eusebio	112,0	66,0	565,0	161,0	49,0
El Verde (93)	123,0	---	---	---	9,6
Sta. Fe (49)	---	394,0	368,0	192,0	127,0
Kade (51)	112,0	252,0	44,0	154,0	26,0

Indice de ingreso - reserva en la vegetación ("vegetación store - input ratio"), definido matemáticamente con

$$\frac{\text{reserva en la vegetación (kg.ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})}{\text{ingreso en el ecosistema (kg.ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})}$$

Esta relación implica los años necesarios para llenar la reserva encontrada en la vegetación en función del ingreso o ganancia atmosférica encontrada. (Cuadro 5.3). El tiempo necesario para renovar las reservas minerales de la vegetación del bosque de San Eusebio, a partir de la descarga atmosférica con las lluvias, es sorprendentemente corto a excepción del potasio (565 años). El valor encontrado para el nitrógeno (112 años) es sorprendentemente comparable con los valores del ecosistema de El Verde y Kade, ya que el rango de deposición de N es muy variable en áreas tropicales.

El valor encontrado para el fósforo (66 años) es relativamente corto, una interpretación de este resultado es muy crítica, ya que la contaminación de las muestras de agua de lluvia con insectos y restos vegetales es frecuente y casi imposible de controlar.

La utilización en interpretación de la relación vegetación-ingreso es, del punto ecológico de la regeneración y sucesión natural de los ecosistemas, de gran importancia. La regeneración de una vegetación forestal secundaria, después de la pérdida del bosque a causa de su utilización por el hombre o por catástrofes naturales, depende de las características del suelo y la disponibilidad de elementos nutritivos y de los ingresos atmosféricos con las lluvias. Los lapsos encontrados para San Eusebio son favorables. La repercusión de la tala del bosque debe verse desde otro punto de vista: en la región montañosa de los Andes existen suficientes ejemplos de los efectos catastróficos de la erosión de los suelos después de la desaparición de la cubierta vegetal.

Indice de reserva - transformación en la vegetación ("vegetation store - turnover ratio"), definido matemáticamente como:

$$\frac{\text{reserva en la vegetación (kg.ha}^{-1})}{\text{índice de transformación (kg.ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})}$$

Esta relación implica los años necesarios para la renovación de la reserva mineral de la vegetación.

Los resultados encontrados para los diferentes elementos químicos en los pocos lugares donde se han conducido estudios, son bastante similares. El lapso para que los elementos inicien un nuevo ciclo en el ecosistema de San Eusebio oscila entre seis (P) y 11 años (K). Los valores para el nitrógeno son sorpresivamente similares en los ecosistemas estudiados, variando entre 5,6 y 6,7 años.

La interpretación de este índice es de interés desde el punto ecológico de la renovación y regeneración natural de los ecosistemas. Una premisa de su utilización está ligada a bosque siempreverde ; la caducifolia implica que con la pérdida (generalmente anual) de las hojas se acorta su vida y así se acelera el ciclo de renovación de los elementos nutritivos. El índice en discusión está relacionado indirectamente con la tasa de descomposición de los residuos vegetales en el suelo; cuanto mayor sea la velocidad de este proceso, tanto más rápido se liberan los elementos y pueden ser absorbidos nuevamente por las plantas.

5.3. El nitrógeno en agroecosistemas

5.3.1. Efecto del fuego sobre el nitrógeno

El fuego es una de las herramientas más valiosas utilizadas por el hombre en la implementación y manejo de la agricultura. Después de la tala de los bosques o vegetación primaria se utiliza generalmente el fuego para la limpieza de los campos, previa a su utilización agrícola. Igualmente se aplica el fuego para quemar los restos de cosechas y mantener los campos limpios. La quema anual de las praderas es igualmente muy generalizada y permite la renovación de los pastizales. Sin embargo, son muy escasos los estudios integrales sobre el efecto del fuego sobre los ecosistemas y los sistemas de producción. Las temperaturas altas que se alcanzan al quemar restos vegetales repercuten especialmente en la materia orgánica, microflora, fauna y elementos nutritivos del suelo, incidiendo así sobre su fertilidad (ver Capítulo 4.3.1).

Fassbender y Bornemisza (37) han descrito recientemente los aspectos de pérdida o ganancia de elementos nutritivos a través de la tumba y quema de los bosques. Trabajos de laboratorio han

demostrado que la volatilidad de compuestos nitrogenados vegetales, a temperaturas entre 300 y 500°C implican una pérdida notable del N. Sin embargo en la ceniza quedan restos de N que son directamente disponibles para las plantas (37).

Una evaluación de las pérdidas de N con la tala y quema en condiciones de campo es muy difícil en función de las condiciones experimentales (bosque, sistema de tumba, contenido de humedad de los restos, factores climáticos -lluvia, viento-, temperaturas del fuego). Algunos valores han sido publicados por Fassbender y Bornemisza (37), las pérdidas son considerables (ver también Capítulo 4.3.1).

5.3.2. El nitrógeno en los agroecosistemas

El contenido y el comportamiento del nitrógeno en el suelo han sido discutidos indirectamente en el capítulo de la materia orgánica (ver Capítulos 4.3.2 y 4.3.3). Los efectos de la tumba y quema de los bosques y la utilización del suelo en sistemas agrícolas o pecuarios conllevan una pérdida muy notable del nitrógeno. Las pérdidas de este elemento nutritivo implican una disminución de la fertilidad de los suelos, causando los problemas descritos anteriormente. Las deficiencias de nitrógeno en los cultivos, después de algunos años de uso intensivo del suelo en sistemas agrícolas o pecuarios, es muy común (26, 37, 102).

Estudios integrales sobre el comportamiento del nitrógeno en agroecosistemas son, sin embargo, escasos hasta ahora. En el Cuadro 4.13 se reproducen los datos de extracción de nitrógeno por los cultivos más importantes recopilados por Sánchez (103). La remoción anual de N por los cereales generalmente oscila entre 20 y 200 kg.ha⁻¹.a⁻¹; las raíces alimenticias alcanzan valores más altos; los pastos de corte presentan tasas de absorción anuales de N de hasta 400 y 800 kg N.ha⁻¹. Dependiendo del rendimiento con la caña de azúcar también se extraen cantidades notables de nitrógeno del suelo. Casi no existe información sobre la concentración y cantidad de nitrógeno en las raíces de los diferentes cultivos; su reciclaje puede ser decisivo en su manejo y conservación.

La complejidad de los estudios integrales del comportamiento del nitrógeno en agroecosistemas se ilustra en los Cuadros 5.4 y 5.5 publicados originalmente por Gliemann (46) para agroecosistemas tradicionales de Tabasco, México. La cuantificación de las reservas y transferencias de N en un agroecosistema implica el estudio de la

Cuadro 5.4. Distribución de biomasa al momento de la cosecha en varios agroecosistemas de Tabasco, México, (t.ha-1) (según Gliesmann, 46).

Agroecosistema	R	CN	PM	CR	MV	FT	TOTAL CULTIVO A	TOTAL PLANTAS ASOCIADAS B	TOTAL EXPORTACION	% COSECH
<u>Colocasia</u> <u>esculenta</u> malanga	0,07	2,84*	0,63	0,20	0,61	0	4,35	3,10	7,45	38,1
<u>Manihot</u> <u>esculenta</u> yuca	6,76*	1,57	0,16	1,50	8,13	0	18,12	5,10	23,22	29,1
<u>Phaseolus</u> <u>vulgaris</u> frijol (asociado)	0,15*	0	0,45*	0	0	1,50*	2,10	8,20	18,44	37,2
<u>Zea mays</u> maíz (asociado)	0,49	0,60	2,29	0	0	4,76*	8,14	----	----	----
<u>Zea mays</u> maíz (monocultivo)	0,34	0,41	1,57	0	0	4,36*	6,68	12,82	19,50	22,3
<u>Oryza sativa</u> arroz	0,96	1,62	1,92	0	8,04	1,74*	14,28	3,41	17,69	9,8

* Porción exportable del cultivo hacia afuera del sistema, muchas veces en forma no procesada.

(R = raíz; CN = corona; PM = muerto en pie; CR = residuo del cultivo sobre el suelo; MV = materia verde; FT = fruto o grano).

Cuadro 5.5. Distribución de nitrógeno después de un año de manejo, en varios agroecosistemas, Tabasco, México ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) (según Gliessmann, 46).

Agroecosistema	A		B		C	Balance de N en la biomasa aérea (B + C) - A
	N-Inicial	N-Final	N-Final	Cosecha N-exportada		
<u>Colocasia esculenta</u> malanga	35	72		31		+ 60
<u>Manihot esculenta</u> yuca	199	142		61		+ 4
<u>Phaseolus vulgaris</u> / <u>Zea mays</u> maíz/frijol	138	109		69		+ 40
<u>Zea mays</u> maíz	26-	192		49		- 19
<u>Oryza sativa</u> arroz	193	35		17		- 141

RENDIMIENTOS: Malanga 8-10 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (fresca) Maíz/frijol 3,0 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ maíz, 0,5 $\text{t} \cdot \text{ha}$ frijol
 Yuca 10-12 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (fresca)
 Arroz 1,5 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$ Maíz 2,6 $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$

biomasa y de la concentración de N en los diferentes órganos o compartimentos (cultivo y plantas asociadas) en observaciones periódicas (Cuadro 5.4) o por lo menos al inicio y final del año experimental (Cuadro 5.5). Los resultados indican que la biomasa total varió considerablemente entre agroecosistemas, diferenciando los cultivos y las plantas asociadas (tallos, troncos, hojarasca, malas hierbas). La exportación de biomasa con las cosechas es igualmente muy diferenciada. Las pérdidas o ganancias anuales de N (Cuadro 5.5) de los diferentes agroecosistemas son una función de las cosechas; se registraron por ejemplo pérdidas para el arroz y maíz solo (141 y $19 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$). La ganancia en la asociación del maíz con frijol ($40 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) puede deberse a la fijación de N por la asociación Phaseolus - Rhizobium. En el caso de la malanga se observó la presencia de algas fijadoras de nitrógeno en el suelo.

Las interacciones entre los cultivos son múltiples (competencia, alelopatía) especialmente en cultivos asociados, intercalados o en rotaciones, tal como lo demuestran los valores de remoción de N en monocultivos, cultivos dobles y triples de frijol, maíz y yuca en condiciones de Turrialba, Costa Rica (22, 67). Generalmente la extracción de N en los bi y tricultivos es más baja que la adición de los cultivos por separado. En el caso del frijol los resultados a veces son contradictorios dependiendo de la fijación de N que no fue estudiada directamente.

El efecto del período del cultivo es decisivo, tal como lo demuestran las tasas de extracción de N de la yuca, en la cosecha, variando entre siete y nueve meses.

Un estudio complejo y completo sobre el comportamiento del nitrógeno en la transformación de un bosque húmedo tropical en agricultura tradicional después de la tumba y la quema en la región amazónica de Venezuela ha sido presentada por Jordan *et al* (73, 74, Figura 5.3). Se determinó la biomasa del bosque primario, la materia orgánica del suelo y sus reservas de nitrógeno total. Después de la tumba y quema se establecieron parcelas de agricultura rotativa de tipo regional ("conuco") con asociaciones de yuca, ananás, maní y plátano, realizándose determinaciones periódicas (seis a 12 meses) de N en los cultivos y suelos. Se analizó la concentración de nitratos en el agua del suelo obtenida con lisímetros y se determinó la tasa de fijación de N. Al abandonarse el área experimental (cuatro años) se realizó un inventario completo del N (suelos, residuos, etc.), los resultados obtenidos se han representado gráficamente (Figura 5.3).

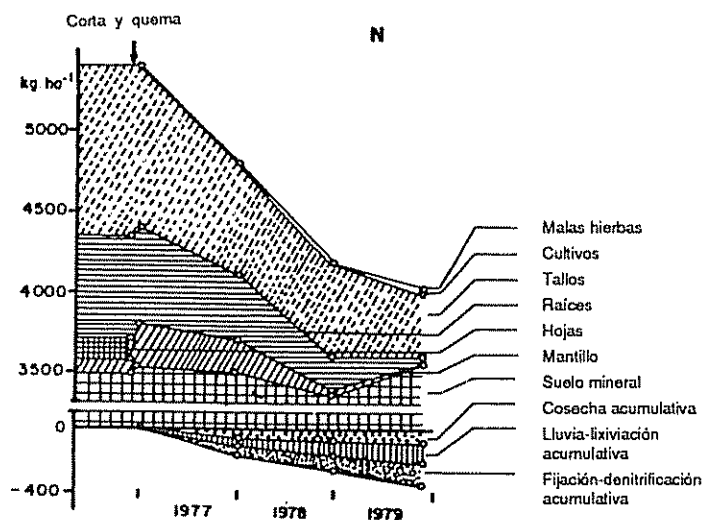


Figura 5.3. Cambios del N al transformar al bosque primario en un agrosistema de "conuco" en la región amazónica de Venezuela (según Jordan *et al.*, 73).

Cuadro 5.6. Remoción de N en diferentes sistemas agrosistemas de cultivos múltiples ($\text{kg.N.ha}^{-1}.\text{cultivo}^{-1}$) (según Jiménez, 67 y Castellanos, 22).

	Solo	Bicultivo	Bicultivo	Tricultivo
Yuca	126,2	+F 138,8	+M 142,1	+F, M 134,1
Frijol	35,8	+M 26,4	+Y 38,2	+Y, M 23,5
Mafz	48,0	+F 70,7	+Y 155,4	+Y, F 138,8
Yuca	258,0	+F ₇ 261,0		
		+F ₈ 298,0		
		+F ₉ 349,0		

La reserva total del sistema antes de la tumba y quema de 5583 kg N.ha⁻¹ disminuyó en el período experimental de cuatro años a 4492 kg N.ha. Por tanto, el 20 % del nitrógeno original fue extraído, salió o se perdió del sistema. La mayor reserva del nitrógeno en el sistema original se encontró en el suelo (3507 kg N.ha⁻¹), la distribución por compartimentos de la fitomasa fue muy diferenciada (hojas 143; tallos, ramas y corteza 941; raíces 586; mantillo 406 kg N.ha⁻¹). La pérdida por la quema del N de las hojas fue casi completa; los otros órganos fueron menos afectados, los tallos presentaron sólo quemaduras superficiales de la corteza. Los residuos que quedaron en el campo presentaron una tasa de descomposición muy rápida.

La concentración de nitratos del agua del suelo de la parcela de control fue constante (1 - 2 mg NO₃.l⁻¹) en los cuatro años de observaciones. En el primer año después de la tumba y quema se observó un aumento notable de hasta 20 mg NO₃-N.l⁻¹ el cual declinó paulatinamente siendo en el tercero y cuarto año experimental comparable con la parcela de control (116).

De la pérdida acumulativa del agrosistema de "conuco" (392 kg N.ha⁻¹.4a⁻¹, Figura 5.3) aproximadamente una tercera parte corresponde a las cosechas, otra tercera parte a la lixiviación del suelo (a pesar de la entrada con las lluvias, 21 kg N.ha⁻¹.a⁻¹) y el resto a la denitrificación.

La importancia de estudios es obvia, a través del balance exacto de las reservas y transferencias de los elementos nutritivos en los agroecosistemas se pueden desarrollar técnicas de mejoramiento y optimización de su producción.

Las pérdidas del N y el mantenimiento de la fertilidad de los suelos se pueden regular con la fertilización nitrogenada. Los aspectos químicos de la transformación de los fertilizantes minerales han sido descritos por Fassbender y Bornemisza (37). Las tasas de aplicación de fertilizantes para cultivos tropicales han sido consideradas en libros específicos.

En el Capítulo 4.3.3 se han presentado los aspectos del manejo del nitrógeno, por medio de la fertilización húmica, a través de:

- residuos vegetales y animales
- utilización y manejo de barbechos
- abonos verdes, materiales de cobertura y
- rotaciones de cultivos

Todos los aspectos presentados se pueden extrapolar al nitrógeno ya que este elemento es un componente importante de estos materiales.

Aquí es necesario destacar la importancia de especies fijadoras de nitrógeno, especialmente leguminosas. Las bases bioquímicas de este proceso han sido descritas en libros especializados (27, 32). La información sobre las tasas de fijación de nitrógeno por diferentes leguminosas es también muy dispersa (19, 27, 32, 37, 96, 98). En el Cuadro 5.7 se han resumido algunos datos disponibles sobre la fijación de nitrógeno por leguminosas (granos y forrajes) y otras angiospermas. Las tasas de fijación oscilan dentro de un ámbito muy amplio. Información sobre la tasa de fijación de N de especies arbóreas es aún muy escasa. Entre los géneros de las leguminosas arbóreas potenciales para su uso en el trópico americano se encuentran:

Mimosoideae: Acacia, Albizia, Calliandra, Leucaena, Mimosa, Pithecellobium, Prosopis, Samanea;

Papilinoideae: Erythrina, Gliricidia, Inga, Rosinia, Sesbania;

Caesalpinioideae: Parkinsonia,

No leguminosas: Casuarina, Alnus

Las leguminosas también tienen la ventaja de ser utilizadas como abonos verdes y cobertura muerta ("mulch") del suelo. La producción de materia seca de 15 leguminosas utilizadas como productoras de abonos verdes en Brasil, se presentaron en el Cuadro 4.14.

En los agroecosistemas pecuarios las interacciones entre los componentes bióticos son más complejas ya que hay que considerar al ganado como parte del sistema (108). La información disponible es escasa, los ejemplos disponibles casi siempre se relacionan con ganado vacuno.

Las praderas como tales presentan un ciclo de N similar al de los cultivos agrícolas anuales o bianuales. Las reservas acumuladas en las plantas forrajeras generalmente se han cuantificado con la producción (Cuadro 4.13), en pradera de corte esta salida del sistema es elevada. En el suelo los residuos de plantas y animales son mineralizados con la liberación de NH_4^+ y conversión a NO_3^- y así esas formas son disponibles para las plantas. Las mezclas de leguminosas en las

praderas son de gran importancia para la fijación de N (Cuadro 5.7) simbiótica y asimbiótica. La deposición de N con las lluvias varía entre 10 y 20 kg N.ha⁻¹.a⁻¹ (Cuadro 3.4.).

Cuadro 5.7. Fijación del N por algunas plantas (ver Hamdi, en FAO 32).

Espece	N-Fijación Promedio kg.ha ⁻¹	Ambitos kg.ha ⁻¹
a) LEGUMINOSAS, Granos		
<u>Vicia faba</u>	210	45 - 552
<u>Pisum sativum</u>	65	52 - 77
<u>Lupinus spp.</u>	176	145 - 208
<u>Phaseolus aureus</u>	202	63 - 342
<u>Phaseolus aureus</u>	61	-
<u>Cajanus cajan</u>	224	168 - 280
<u>Vigna sinensis</u>	198	73 - 354
<u>Canavalia ensiformis</u>	49	-
<u>Cicer arietinum</u>	103	-
<u>Lens culinaris</u>	101	88 - 114
<u>Arachis hypogaea</u>	124	72 - 124
<u>Cyanopsis tetragonolobus</u>	130	41 - 220
<u>Calopogonium mucunoides</u>	202	370 - 450
b) LEGUMINOSAS, Forrajes		
<u>Centrosema pubescens</u>	259	126 - 395
<u>Desmodium intortum y D. canum</u>	897	-
<u>Leucaena glauca</u>	277	74 - 584
<u>Lotononis bainesii</u>	62	-
<u>Sesbania cannabina</u>	542	-
<u>Stylosanthes spp.</u>	124	-
<u>Mesda spp.</u>	115	-
<u>Phaseolus atropurpurea</u>	291	-
<u>Midanea cordata</u>	120	-
<u>Pueraria phaseoloides</u>	99	-
<u>Entherolobium saman</u>	150	-
c) NO LEGUMINOSAS, Angiospermas		
<u>Casuarina</u>	299	3 - 15
<u>Mirica</u>	---	-
<u>Alnus</u>	---	26 - 300
<u>Hippophea</u>	---	2 - 179
<u>Ceanothus</u>	60	-
<u>Dryas</u>	---	18 - 61

La mayor parte del N que pasa a través de las pasturas y el ganado es retornado al suelo con los residuos de las plantas y excreciones de los animales (108). Los contenidos de N en las heces y en la orina son altos. Ganado de engorde excreta hasta el 90% del N ingerido. Las pérdidas de volatilización pueden ser considerables. La

remoción de N en forma de leche o carne es probablemente pequeña, especialmente en condiciones de pastoreo extensivo. El ganado vacuno contiene alrededor de 2,4% de N en su cuerpo vivo; una producción anual de 100 kg de carne por hectárea implica una remoción de 2,4 kg N.ha⁻¹.a⁻¹. La leche de vaca contiene 0,5 a 0,6% N (108).

5.3.3. El nitrógeno en plantaciones forestales

La información sobre el ciclo del N en plantaciones forestales en áreas tropicales y subtropicales es muy escasa; la mayor parte de la información disponible se refiere a plantaciones en áreas templadas (37, 45, 96, 98).

Cuadro 5.8. Nitrógeno acumulado en diferentes plantaciones forestales (kg.ha⁻¹; según diferentes autores).

Edad (a)	Pino	Caribe ¹	Teca ²	Agathis ³
	6	10	25	40
Hojas	92,5	126,0	79,2	778
Ramas	25,7	51,9	204,3	462
Tallos	82,7	137,7	515,5	1,179
Corteza	20,5	58,7	152,5	123
Raíces	39,4	89,0	?	?
Mantillo	18,1	88,7	89,0	?
TOTAL	278,9	598,3	951,6	2,542

1 En Ibadán, Nigeria, según Egunjobi y Bada (30)

2 Nigeria, según Nwoboshi (91)

3 Java, Indonesia, según Bruijnzeel y Wiersum (18)

En las plantaciones forestales se observa un ciclo cerrado de elementos nutritivos, incluyendo al nitrógeno. Con el desarrollo de los árboles se genera y acumula biomasa aérea y radicular en el sistema; paulatinamente se producen residuos vegetales los cuales son descompuestos y mineralizados liberándose nitrógeno disponible para las plantas. Los raleos y las cosechas son las fuentes más importantes de N del sistema. La quema de los residuos de cosechas llevan a pérdidas notables de este elemento. Otra fuente de pérdida es la lixiviación de $\text{NO}_3\text{-N}$ y $\text{NH}_4^+\text{-N}$ con el agua freática. Como fuente de ganancia debe considerarse el N del agua de lluvia, que ocasionalmente se fertiliza.

La tendencia del aumento de la reserva de N en la plantación con la edad, se observa claramente en los valores de diferentes condiciones y edades. Lógicamente las especies y las condiciones del sitio forestal regulan directamente las posibilidades de absorción de N por las especies arbóreas.

Las cantidades de N en los residuos vegetales (hojas o agujas) generalmente oscila entre 60 y 120 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$. De esta manera se forma la capa de mantillo donde se encuentran cantidades y variables de N (20 a 200 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$).

Un balance completo del nitrógeno de plantaciones forestales se observa en el Cuadro 5.9 para Pinus patula y Cupressus lusitanica en una rotación de 30 años en las montañas de Tanzania, de acuerdo con los resultados de Lundgren (86). El ciclo del N es bastante intensivo, la demanda anual de N para P. patula alcanza a 145 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, sin embargo gran parte retorna al suelo como hojarasca (64 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) o queda como residuo de cosecha en el campo (1231 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) después de la extracción de la madera utilizable (773 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$). De todo ello resulta una extracción neta de 40 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$. El valor comparable para el ciprés es de 28 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$.

En la Figura 5.4 se presentan las transformaciones del N al tumar y quemar el bosque primario para convertirlo en una plantación de Pinus caribaea en Jari, Brasil, de acuerdo con los resultados de Jordan y Russell (72). El eje vertical representa la suma de N en el suelo, hojarasca y vegetación.

El bosque primario se cortó varios meses del "tiempo O" y la plantación se estableció en el "tiempo O". Las pérdidas debidas a la cosecha se calcularon con base en datos sobre prácticas de manejo en Jari. La volatilización del nitrógeno se calculó por diferencia. Las pérdidas netas por lixiviación son los totales para la vida de la

Cuadro 5.9. Balance del nitrógeno en rodales de Pinus patula y Cupressus lusitanica en Tanzania durante una rotación de 30 años ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$); según Lundgren, 86)

	<u>Pinus patula</u>	<u>Cupressus lusitanica</u>
1. Demanda anual promedio	145	102
2. Retorno anual al suelo	64	50
3. Remoción por raleos por año	14	10
4. Retenido en la biomasa por año	67	42
5. Inventario total a la edad de rotación	2004	1263
6. Remoción en las trozas por corta total	773	560
7. Restos en el suelo por corta total	1231	703
8. Remoción total del sitio	1205	845
9. Remoción promedio anual	40	28

Notas: 1. = 2 + 3 + 4

2. = nutrimentos retornados en la hojarasca, raleo; broza y lavado de lluvia

3. = capital total en troncos de raleo (madera + corteza) /30

4. = inventario total a la edad de rotación (5)/30

6. = inventario en los troncos (madera + corteza) a la edad de rotación

7. = inventario en el follaje y ramas + conos a la edad de rotación

NITROGENO

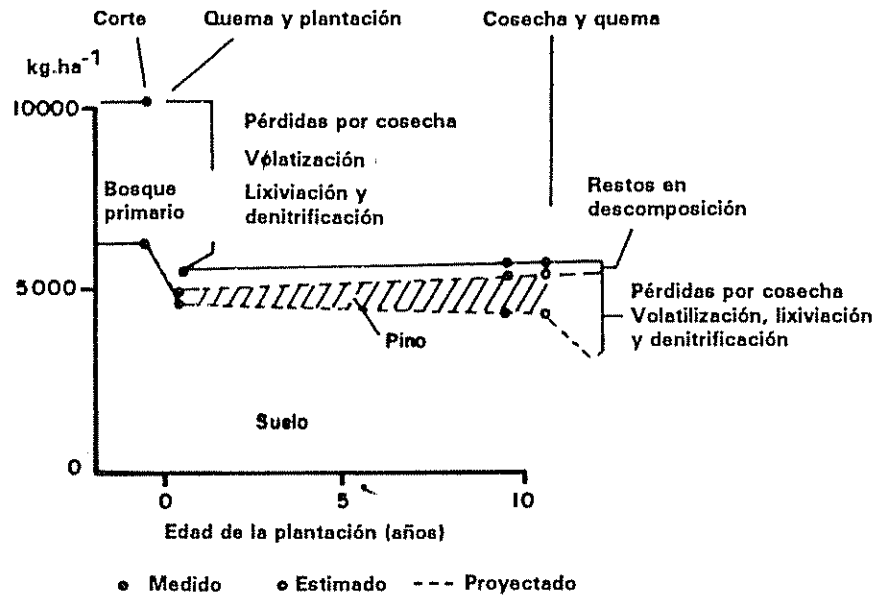


Figura 5.4. Cambios del N al transformar al bosque primario en una plantación de pino caribe, en Jari, Brasil (según Jordan y Russell, 72, 74).

plantación. Para ilustrar el recuento de todos los nutrientes después del corte de un bosque primario o de una plantación, las pérdidas por lixiviación y volatilización se muestran como si ocurrieran solamente en el momento del corte. Las líneas curvas de interpolación se basan en el patrón de lixiviación, acumulación de biomasa, y contenido de nutrientes, que se encontraron en un estudio continuo a lo largo de cinco años del crecimiento del bosque luego del corte y quema en el norte de la cuenca amazónica, sobre suelos similares (Uhl y Jordan, 116).

Con la quema del bosque primario se perdió casi el 50% del nitrógeno acumulado en el sistema. La acumulación de N en el pino caribe en el turno de 10 años alcanza aproximadamente 1000 kg.ha^{-1} . Dependiendo del sistema y el manejo de la cosecha (quema de los residuos) es factible que se pierda nuevamente esta cantidad de nitrógeno.

De los Cuadros 5.8 y 5.9 se desprende que la extracción de N en las plantaciones forestales oscila entre 20 y $60 \text{ kg N.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$, siendo así menor que en otros agroecosistemas.

Para la interpretación ecológica del impacto de los agroecosistemas, especialmente de las plantaciones forestales sobre el ciclo del nitrógeno debe considerarse la deposición de N con el agua de lluvia. De los resultados presentados en el Cuadro 3.4 se desprende que en regiones tropicales se adicionan entre 10 y 20 kg N.ha⁻¹.a⁻¹ con el agua de lluvia. Ello implica en 50 años -como un valor máximo para el turno de las plantaciones- una adición de 500 a 1000 kg N.ha⁻¹. Con estas cantidades de N se compensan en gran parte las pérdidas de exportación con las cosechas.

5.4. El nitrógeno en sistemas agroforestales

5.4.1. Aspectos generales

Las bases generales del modelaje de los ecosistemas (Capítulo 1.3.3) y de agroecosistemas (Capítulo 2.2.4) y de sistemas agroforestales (Cap. 2.6) son aplicables para describir adecuadamente el ciclo del nitrógeno en sistemas agroforestales. La base de la descripción del ciclo del N es el conocimiento del ciclo de la materia orgánica (Cap. 4.4) y la determinación de N en todos los materiales de acumulación y transferencia dentro del sistema. Como fue indicado anteriormente existe un interés especial en el modelaje de la materia orgánica de sistemas agroforestales (Cap. 4.4.1) y subsiguientes) sin embargo, la información sobre los elementos nutritivos es aún escasa. Existen ejemplos sobre el ciclo del N de árboles de sombra con café (1, 4, 8, 9, 36, 38, 47, 48, 60, 87, 88), cacao (1, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 20, 35, 40, 41, 42, 61, 62, 63, 88, 89, 102, 105, 106, 107) de árboles en praderas (2, 7, 10, 97) así como de plantaciones de caucho y palma aceitera con plantas de cobertura del suelo (89, 100) los cuales serán tratados en los siguientes acápite.

5.4.2. Sistemas de café con árboles de sombra

Café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica.

La información disponible y el modelo del ciclo del N de sistemas de café con árboles de sombra se basan en los resultados obtenidos en el Experimento Central del CATIE (Información general en Cap. 3.4.3; ciclo de la materia orgánica Cap. 4.4.2.) (1, 7, 36, 38, 60).

En la Figura 5.5 se presentan los modelos de los ciclos del N. Para los modelos se han considerado los siguientes valores de nitrógeno:

- Acumulados en la biomasa del café y poró a 4,5 años de edad, del laurel a cinco años de edad y en el suelo al inicio del experimento (Cap. 4.4.2).
- Transferidos en los residuos naturales y de poda en el quinto año, considerando su mineralización completa durante un año.
- Cosechados en el quinto año.
- Extraídos del suelo para compensar el crecimiento de los componentes.
- Aplicados como fertilizante y depositados con el agua de lluvia

En el Cuadro 5.10 se han presentado las concentraciones de N en los diferentes órganos de las especies vegetales y de la capa de mantillo de los sistemas estudiados. Se observa que las concentraciones son más altas en las hojas con valores comparables en el café (2,45 y 2,49%) y valores diferenciados en los árboles de sombra (laurel 2,79, poró 4,00%). La alta concentración en las hojas de Erythrina es explicable por la fijación de nitrógeno de esta especie leguminosa en asociación simbiótica con Rhysobium.

El contenido de N sigue el orden raíces > ramas > troncos. La capa de mantillo tiene un valor alto explicable por su composición de hojarasca reciente que cae al suelo.

De la Figura 5.5. se pueden tomar los valores de N ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) acumulados en los diferentes órganos de las especies presentadas en el Cuadro 5.11. Los frutos del quinto año se pueden considerar como una biomasa dinámica de los sistemas y corresponde a 17,3 y 65,6 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ para café con laurel y café con poró respectivamente.

Los valores totales de N son comparables, pero la distribución presenta características muy diferentes para los dos sistemas. Por eso, la biomasa aérea del sistema café con poró corresponde a 587 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$, mientras que en el sistema asociado al laurel sólo acumuló 286 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$. Las raíces finas correspondientes son 43,4 y 58,4 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$. En los arbustos de café se registraron 99,1 y 181,7 $\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$ bajo la sombra de laurel y poró respectivamente. Los árboles de sombra acumularon el N en forma muy diferenciada, predominando en el caso

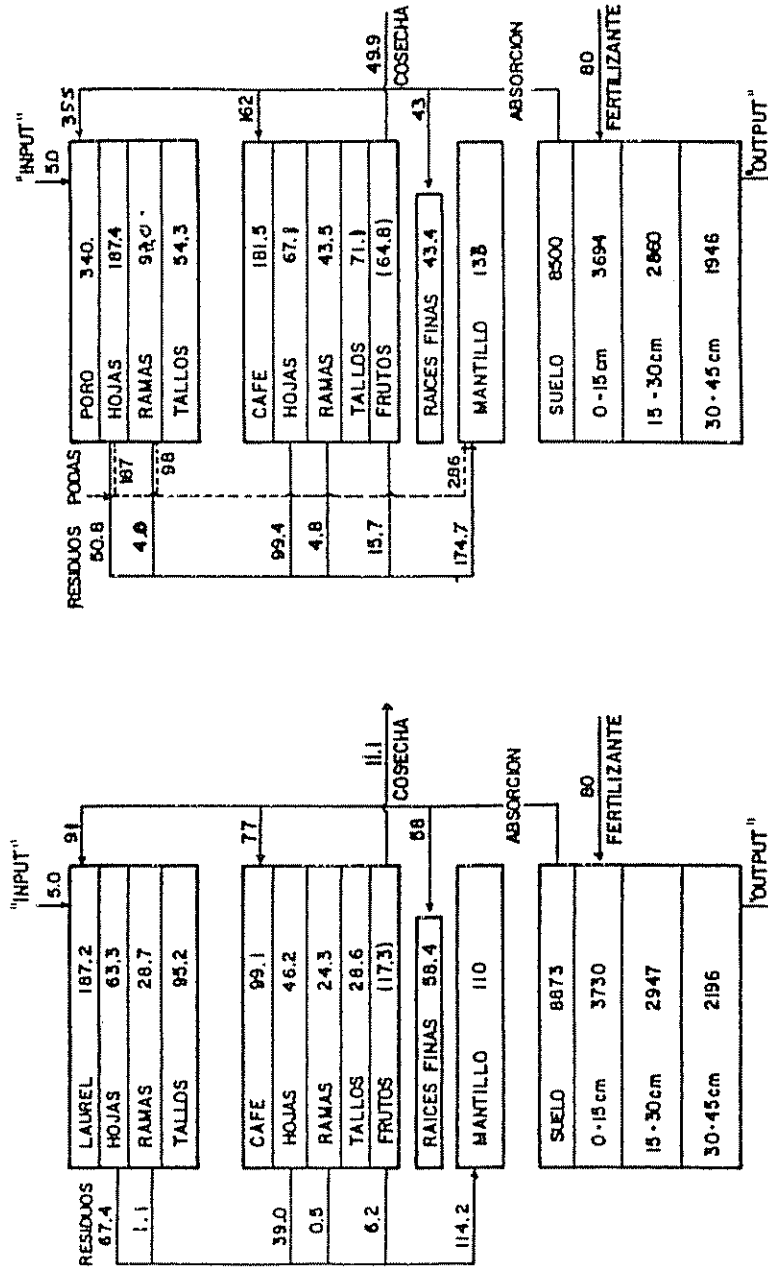


Figura 5.5. Modelos del ciclo de N en los sistemas agroforestales de café con laurel y café con poró en Turrialba, Costa Rica (reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; según Alpizar et al, 2; Fassbender et al, 36; Heuveldop et al, 60).

Cuadro 5.1.1. Reservas de nitrógeno acumuladas en la biomasa y el suelo de los sistemas de café con laurel y café con poró (kg.ha⁻¹, según Alpizar et al, 2; Fassbender, 38).

	Café con laurel		Café con poró	
Hojas	46,2	63,3	67,1	187,4
Ramas	24,3	28,7	43,5	99,0
Tallos	28,6	95,2	71,1	54,3
Raíces		58,4		43,4
Mantillo		110		133
Suelo (0-45 m)		8873		8500
TOTAL		9328		9199

del laurel, los tallos y en el caso del poró, las hojas. Así se reconoce la influencia de una especie leguminosa fijadora de nitrógeno en su acumulación en los sistemas.

La capa de mantillo es una reserva transitoria de elementos nutritivos; los residuos vegetales se encuentran en los procesos de mineralización y humificación; los valores encontrados dependen de la época de la determinación específica.

Las reservas de N del suelo son elevadas y representan para la asociación con laurel el 95 y para la asociación con poró, el 92 % del N-total del sistema. La diferencia en el N-total acumulado en el suelo (8873 y 8500 kg N.ha⁻¹ bajo café con poró y café con laurel respectivamente) pueden ser considerados dentro del error analítico a las muestras del suelo y su cálculo a kg N.ha⁻¹.

La dinámica del nitrógeno en el sistema en descripción se caracteriza con la producción de residuos vegetales naturales y con la práctica de la poda. El contenido de N en los residuos vegetales (Cuadro 5.12) generalmente es más bajo que en los órganos frescos de las plantas (Cuadro 5.10); ello es explicable por procesos de reabsorción de nutrimentos antes de la caída de la hojarasca y también en parte por la recolección solo periódica de las muestras correspondientes.

La diferenciación notable del N transferido con los residuos se localiza definitiva en el manejo de las podas. Los residuos naturales alcanzaron 114,2 y 174,7 kg N.ha⁻¹.a⁻¹ bajo café con laurel y café con poró respectivamente. En el último caso, además, se puntualizan 286,7 kg N.ha⁻¹.a⁻¹ con las podas.

Los valores de la transferencia de N con los residuos varían lógicamente de acuerdo con la producción anual de residuos (Cuadro 4.24).

Al comparar los valores de circulación de N con los datos de cosecha o de acumulación en la biomasa, se puede indicar que el ciclo del N en los sistemas en estudio, especialmente en café con poró, es muy rápido y que el N tiene un reciclaje muy intensivo; el ciclo se mantiene prácticamente con la producción y descomposición de los residuos. La importancia de la producción de residuos vegetales y mineralización del N se reconoce con los valores totales de transferencia de este elemento (Cuadro 5.12, Cuadro 4.25). Los últimos valores presentan un rango entre 114 y 461 kg N.ha⁻¹.a⁻¹, dependen de las especies involucradas en los sistemas agroforestales y especialmente

Cuadro 5.12. Contenido de elementos nutritivos en los residuos vegetales (%) de los sistemas café con laurel y café con poró y transferencias totales por año (según Alpizar, 1; Heuveldop *et al.*, 60).

CAFE + LAUREL						
	Café hojas	Café ramas	Café frutos	Laurel hojas	Laurel ramas	TOTAL ANUAL kg.ha-1.a-1
N	1,97	1,23	1,50	2,16	0,84	114,2
P	0,13	0,11	0,15	0,13	0,11	7,3
K	1,17	0,47	1,63	0,74	0,87	54,3
Ca	1,42	0,96	0,62	2,47	1,34	109,9
Mg	0,53	0,30	0,17	0,81	0,58	37,3

CAFE + PORO						
	Café hojas	Café ramas	Café frutos	Poró hojas	Poró pecíolo	Natural
N	2,27	1,50	1,64	3,94	1,59	174,7
P	0,12	0,12	0,15	0,19	0,14	10,4
K	1,04	0,68	1,45	0,65	1,23	75,2
Ca	1,67	1,02	0,56	2,08	1,92	121,6
Mg	0,51	0,27	0,14	0,42	0,74	33,1

del manejo de las podas (1, 7, 9, 10, 21, 36, 37). Los árboles de sombra contribuyen generalmente entre el 50 y 70 % del N reciclado, especialmente al ser podados dos ó tres veces al año. El material fácilmente mineralizable, o sea las hojas con su alto contenido de N, también predomina en el total de los residuos.

Comparando los datos de transferencia con residuos con los de las cosechas de los sistemas se constata que el reciclaje es mucho mayor que la exportación. Así el funcionamiento del ciclo y la nutrición nitrogenada del café se garantiza con la regulación del sistema, en forma de un circuito interno permanente.

La aplicación de fertilizantes en los sistemas en estudio debe reconsiderarse. El N exportado con las cosechas es mínimo en comparación con las reservas y la transferencia.

La extracción de N del suelo por los sistemas se puede cuantificar de la manera siguiente ($\text{kg ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ en el quinto año experimental) (1, 36):

	Café con laurel		Café con poró	
Hojas	46,2	63,3	67,1	50,8
Ramas	6,3	6,3	11,3	4,0
Tallos	7,4	20,9	18,5	13,5
Frutos	17,3	-	65,6	-
Podas	-	-	-	286,4
Subtotal	77,2	90,5	162,5	351,7
Raíces finas	58,4			43,4
TOTAL	226,1			560,6

Estos datos están basados en el incremento anual de los tallos y ramas del laurel (22%), café (26%) y del poró (25%). En el caso de las hojas y ramas del poró se considera la biomasa actual y las podas anuales correspondientes. En el caso de las hojas de café y laurel existen a veces algunas discrepancias en los datos encontrados en la biomasa y los residuos anuales; así, por ejemplo, para el café con laurel se registran valores de 46,2 y 39,0 kg ha^{-1} respectivamente. Para el cálculo correspondiente se utilizó el dato de la biomasa.

Una limitación muy grande de estos estudios es que no se conocen los valores correspondientes de las raíces gruesas del sistema. Ellas acumulan seguramente cantidades apreciables de N y en su incremento se genera una fuente de absorción de N.

La determinación de la tasa de fijación de nitrógeno en sistemas agroforestales con árboles de sombra leguminosos es de especial importancia. Para el sistema café con poró se pueden hacer sólo cálculos de aproximación para encontrar este valor (36, 38).

La acumulación de N en la vegetación y el mantillo en los próximos 4,5 años experimentales se resume en los siguientes valores (kg ha^{-1}):

	Café con laurel	Café con poró
N en fitomasa y mantillo	455	699

Las cantidades de N acumuladas en las cosechas de café (1979-1984) y con el raleo de madera (1981) alcanzaron (kg ha^{-1}):

	Café con laurel	Café con poró
Extracción de N con cosechas	160	213

La extracción total de N del suelo por los sistemas en estudio durante el ciclo experimental resulta así de (kg ha^{-1}):

Extracción total de N	605	912
-----------------------	-----	-----

La acumulación de N es así muy diferenciada. La relación de N en la fitomasa de café/laurel es de 1,54. Los árboles de sombra acumularon N especialmente en el tallo en el caso del laurel y en las hojas en el caso del poró. La relación de las cosechas es de 1,33 entre café/poró y café/laurel. La diferencia total de acumulación de N en el lapso experimental es de $305 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$, equivaliendo en promedio anual a $60 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. Este valor refleja la mayor actividad nutritiva del sistema bajo sombra de poró y puede considerarse como una apreciación del mejor aprovechamiento de N y de la fijación de N por la leguminosa en el sistema.

Como fue indicado anteriormente, la información disponible sobre la fijación de N por árboles leguminosos es aún muy escasa (15, 23, 27, 32) y depende en gran parte de la metodología utilizada. En otros estudios realizados en sistemas agroforestales de café con árboles de sombra en México (87) y Venezuela (5) se han encontrado tasas de fijación de N igualmente entre 50 y $60 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$.

Un balance completo del N en el suelo no es factible mientras no se conozca la tasa de lixiviación de N. Sin embargo, es posible puntualizar los siguientes valores ($\text{kg ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$):

	Café con laurel	Café con poró
<u>Ganancias</u>		
Fertilizante	80	80
Agua de lluvia	5	5
Residuos vegetales	114	461
Fijación de N	-	60
TOTAL	199	606
<u>Pérdidas</u>		
Absorción	226	561
Filtración	desc.	desc.

Los datos de este balance deben tomarse con precaución. Aparentemente en el sistema café con laurel se están utilizando las reservas de N del suelo y acumulando progresivamente en la biomasa. En el caso del sistema de café con poró la fijación de N por la leguminosa compensa la diferencia entre ganancias y pérdidas del suelo. No hay duda que las pérdidas por lixiviación implicarán un menoscabo paulatino del N del sistema. Para ello serán necesarios estudios específicos. Igualmente a través de muestreos periódicos a largo plazo del suelo y análisis del nitrógeno (p.e. a los 10 años experimentales) se podrá establecer un balance de N más exacto.

Café con leguminosas en La Cumaca, Venezuela

En la Figura 5.6 se presenta el modelo del ciclo del nitrógeno para un sistema agroforestal de café bajo sombra de leguminosas en La Cumaca, Caracas, Venezuela (1380 msnm, 20°C temperatura promedio anual, 1200 mm lluvia promedio anual, suelo derivado de esquistos micaceos tipo ultisol), de acuerdo a los datos obtenidos por Aranguren *et al* (4, ver también Cuenca *et al*, 24, Herrera *et al*, 59). Se trata de una plantación adulta de café (*Coffea arabica* var. Caturra mezclado con var. "Mundo nuevo") con sombra alta (15 a 20 m) de *Erythrina* spp. e *Inga* spp., con algunos árboles de *Musa*, *Clethra*, *Ficus*, *Cedrella* y *Heliocarpus*. El cafetal de 20 años no ha recibido fertilizantes.

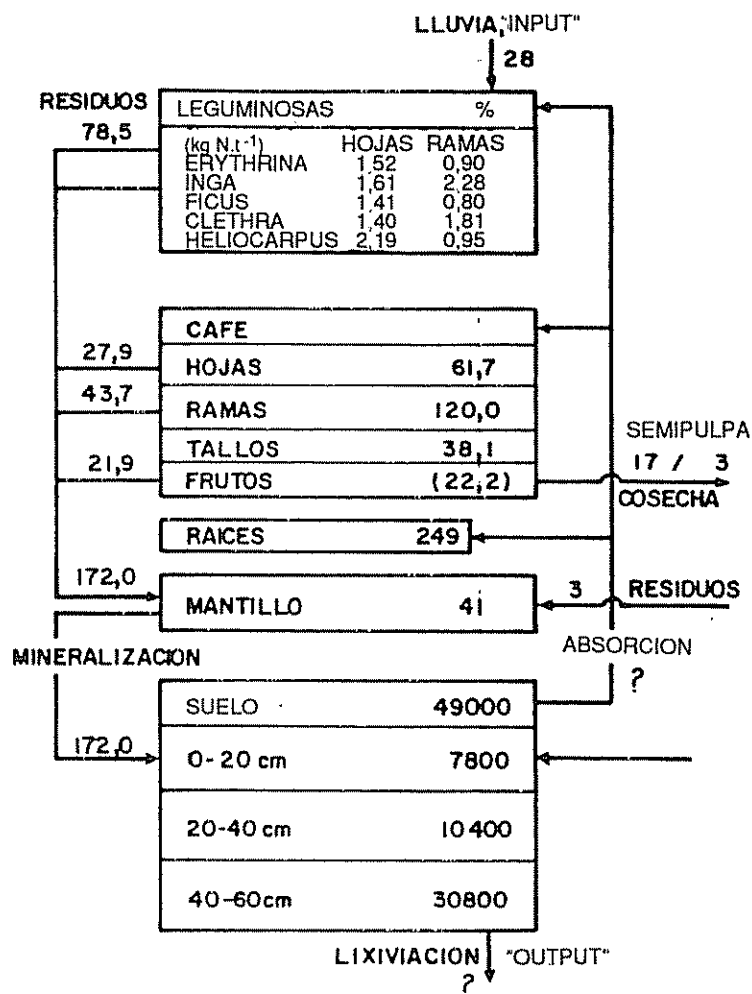


Figura 5.6. Modelo del N en café con sombra de leguminosas en La Cumana, Venezuela (reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; según Aranguren *et al.*, 6; Herrera *et al.*, 59).

La acumulación de N en la biomasa alcanzó $569 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en las plantas de café, de los cuales $249 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ se encontraron en las raíces. En la capa de mantillo se encontraron $10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. El total de aproximadamente 1000 kg representa una fracción pequeña del N-total del suelo que alcanzó $49059 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (0-50 cm). La acumulación de N en la biomasa de las leguminosas es desconocida, solamente la concentración en las hojas y ramas, las cuales son altas (Figuras 5.6).

Mediante los procesos de incorporación de residuos vegetales provenientes del café $93 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ y de las leguminosas $79 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, se alcanza una deposición de $172 \text{ kg ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ sobre la capa de mantillo. Los residuos son mineralizados e introducidos en el suelo, siendo nuevamente objeto de absorción.

Lo interesante en este sistema, es que con una cosecha de 700 kg de frutos secos, sólo se están exportando $17,2 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. El valor de la recirculación del elemento, a través de la pulpa del grano, la cual se reintegra al sistema para su mineralización en el suelo, corresponde a $3,2 \text{ kg ha}^{-1}$.

El ingreso de N con el agua de lluvia es elevado, equivalente a $28 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$. La descomposición de los residuos vegetales fue objeto de estudios bastante específicos. La mineralización y liberación del nitrógeno acumulado es muy rápida, en el término de pocos meses los $172 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ de la hojarasca producida pasan al suelo. Se observó una sincronización adecuada entre el ritmo fenológico de los árboles de sombra y las necesidades de elementos nutritivos en las plantas de café.

5.4.3. Sistemas de cacao con árboles de sombra

Cacao (Theobroma cacao) con laurel (Cordia alliodora) y con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica.

La información disponible sobre el ciclo del nitrógeno de los sistemas arriba indicados se basa en los resultados obtenidos en el Experimento Central del CATIE (Información general Capítulo 3.4.3; ciclo de la materia orgánica Capítulo 4.4.3) (3, 7, 10, 11, 12, 35, 40, 41, 42, 61, 62, 63). Tal como fue mencionado en ese Capítulo los estudios de los ciclos de la materia orgánica, elementos nutritivos (N, P, K, Ca, Mg) y agua se han realizado en forma muy intensiva. Inicialmente se han publicado modelos del ciclo de nitrógeno a la edad de cinco años de los sistemas agroforestales (3, 11, 35, 40, 61, 62). Posteriormente en función de los estudios para la edad de cinco a 10 años de los sistemas agroforestales se han preparado y publicado modelos quinquenales de la materia orgánica y de los elementos nutritivos (11, 12, 41, 42).

En las Figuras 5.7 y 5.8 se presentan los ciclos quinquenales (1983-1987) de nitrógeno respectivos, para ello se han considerado los siguientes valores de nitrógeno:

- Promedio de los valores de nitrógeno acumulados en la biomasa de cacao, poró, laurel a la edad de cinco y 10 años (3, 11, 12, 41).
- Promedio de nitrógeno en total en el suelo (0 a 45 cm) a los 0,5 y nueve años (3, 11, 12, 41).
- Transferencia con los residuos vegetales naturales (cinco años, edad seis a 10) y de poda (dos años, edad ocho a 10) (3, 11, 12, 41).
- Cosechados en el período quinquenal (1983-1987) (11, 12, 41).
- Depositados con el agua de lluvia (62).
- Lixiviados con el agua de percolación (62).
- Aplicados como fertilizante durante el quinquenio en estudio.
- Extraídos del suelo por los componentes vegetales para compensar las tasas de crecimiento (N acumulado en vegetación 10 años menos cinco años) y la extracción con la cosecha de cacao.

Del Cuadro 5.13 se desprende que el contenido de nitrógeno de los diferentes componentes vegetales es muy variable, existiendo tendencias definidas entre órganos y especies. De manera general los contenidos en el sistema cacao con poró son más altos que los del sistema cacao con laurel. Ello es explicable por la fijación de nitrógeno de la especie leguminosa (*Erythrina poeppigiana*) en asociación simbiótica con *Rhizobium*. El contenido de N presenta el orden siguiente entre órganos vegetales, hojas > raíces > ramas > tallos. El contenido de las hojas sigue el orden poró > laurel > cacao. Sin embargo el valor de las hojas del poró (3,1%) no es tan elevado como el encontrado para esta especie en asociación con café (4,0%, ver Cuadro 5.10). Las hojas de cacao también presentan valores menores que las hojas del café (Cuadro 5.10).

Cuadro 5.13. Contenido de elementos nutritivos en los compartimentos de la vegetación de los sistemas cacao con laurel y cacao con poró en Turrialba, Costa Rica (porcentaje: Alpizar et al, 3).

ELEMENTO	C A C A O + L A U R E L									
	HOJAS		RAMAS		TALLOS		RAICES		MANTILLO	
	Cacao	Laurel	Cacao	Laurel	Cacao	Laurel	Cacao	Laurel	Cacao	Laurel
N	1,88	2,79	0,61	0,91	0,37	0,40	0,92	1,71		
P	0,12	0,24	0,13	0,19	0,13	0,05	0,10	0,11		
K	1,01	2,28	1,14	1,18	0,78	0,46	0,51	0,22		
Ca	1,40	1,72	1,16	0,46	0,40	0,54	1,06	1,90		
Mg	0,54	0,82	0,32	0,26	0,46	0,17	0,33	0,48		

ELEMENTO	C A C A O + P O R O									
	HOJAS		RAMAS		TALLOS		RAICES		MANTILLO	
	Cacao	Poró	Cacao	Poró	Cacao	Poró	Cacao	Poró	Cacao	Poró
N	2,08	3,10	1,04	1,19	0,50	0,54	1,23	1,58		
P	0,12	0,24	0,13	0,14	0,10	0,06	0,13	0,12		
K	0,56	1,30	0,64	1,33	0,56	0,76	0,99	0,17		
Ca	1,28	1,63	1,26	1,24	1,84	0,72	1,08	1,18		
Mg	0,34	0,49	0,20	0,42	0,32	0,24	0,26	0,14		

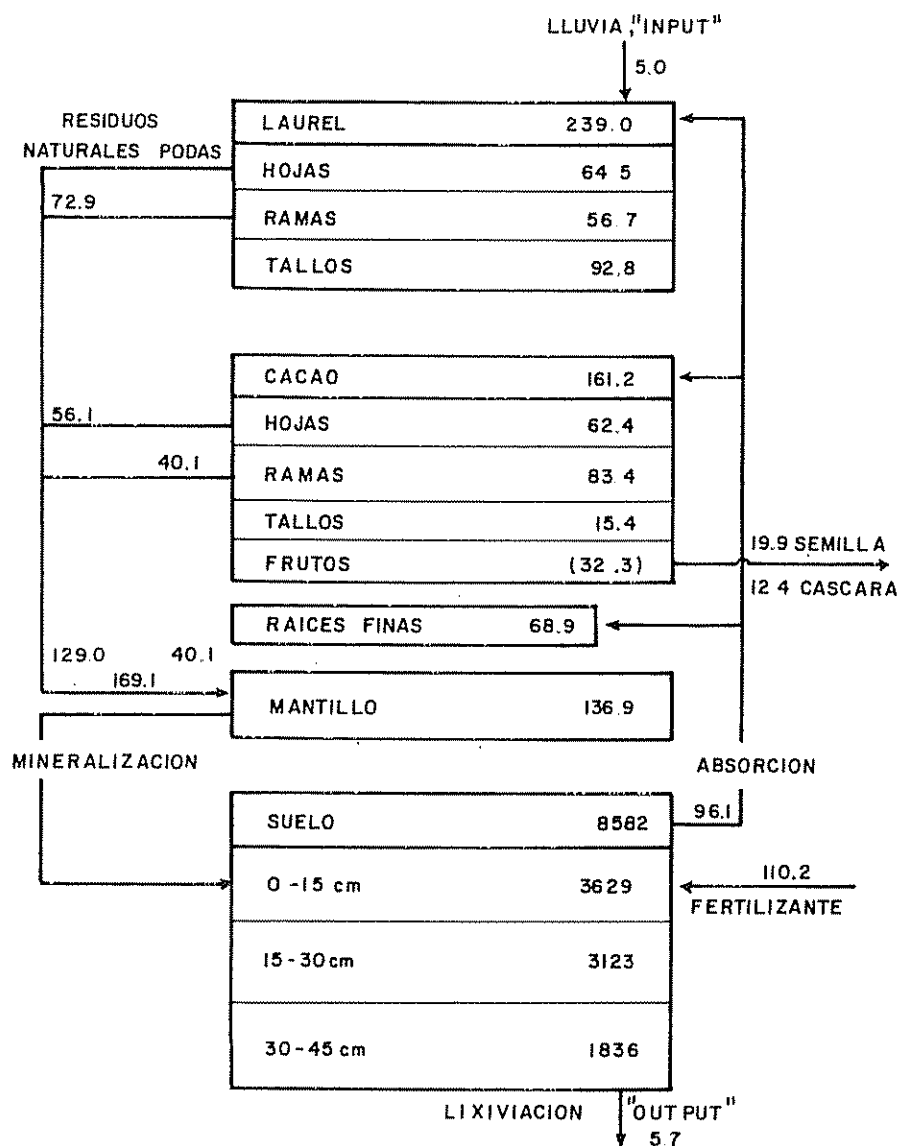


Figura 5.7. Modelo quinquenal del nitrógeno (1983 a 1987), seis a 10 años de edad del sistema agroforestal de cacao/laurel. Reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (según valores de Alpizar *et al.*, 3; Beer *et al.*, 11, 12; Fassbender *et al.*, 40, 41; Imbach *et al.*, 62, 63 y valores provisionales aún no publicados).

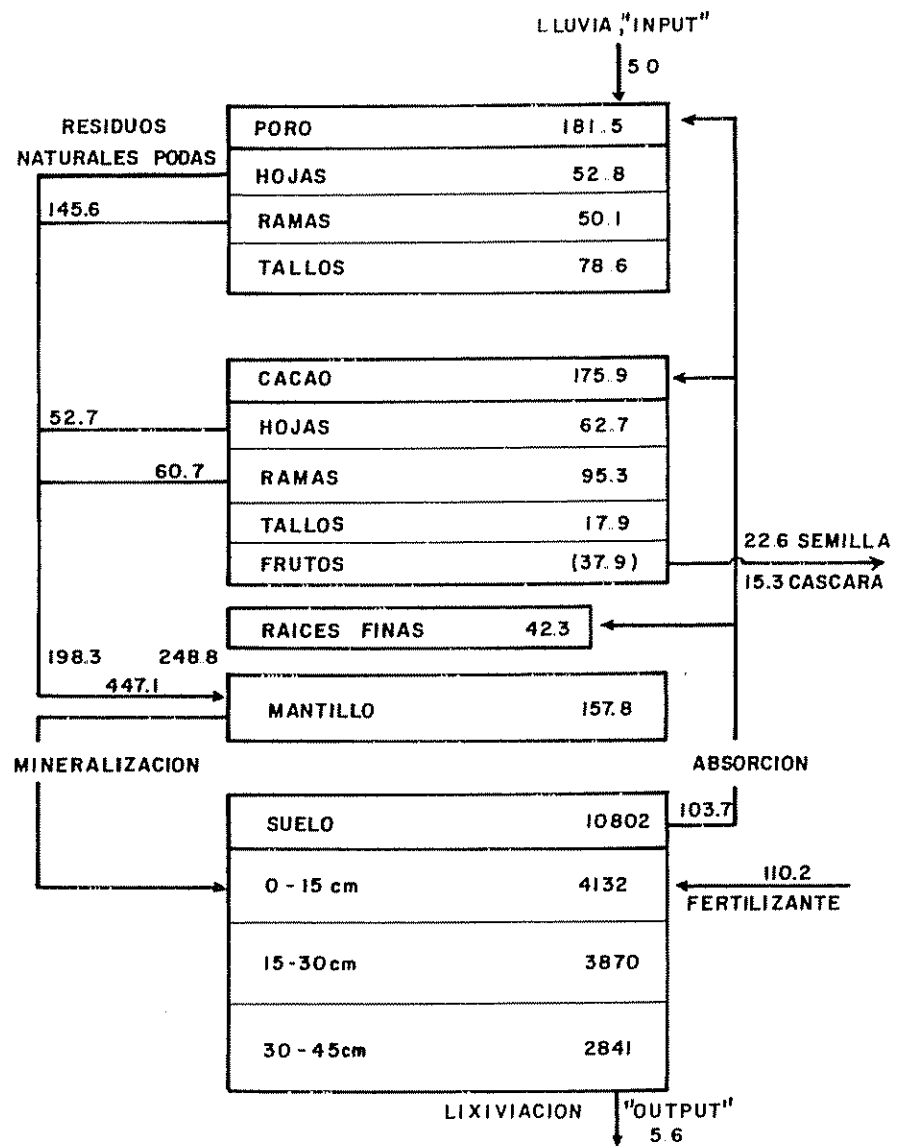


Figura 5.8. Modelo quinquenal del nitrógeno (1983 a 1987), seis a 10 años de edad del sistema agroforestal de cacao/poró. Reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (según valores de Alpízar *et al.*, 3; Beer *et al.*, 11, 12; Fassbender *et al.*, 40, 41; Imbach *et al.*, 62, 63 y valores provisionales aún no publicados).

Los valores del nitrógeno en la capa de mantillo son difíciles de interpretar, ya que esta capa es transitoria y especialmente su contenido de nitrógeno es utilizado en forma intensiva por los microorganismos.

En el Cuadro 5.14 se presentan los valores de las reservas de nitrógeno encontrados en los dos sistemas agroforestales estudiados.

De manera general los resultados obtenidos para los diferentes elementos nutritivos acumulados en la vegetación en los sistemas en estudios son comparables, tanto a la edad de cinco y 10 años, pero presentan características diferenciales entre ellas. Con análisis estadísticos no es factible pues se trata sólo de dos observaciones (edades).

Para todos los elementos en estudio, especialmente el nitrógeno se concluye que la acumulación de elementos nutritivos en los primeros cinco años fue más acelerada en los subsiguientes años. En el caso del nitrógeno en el sistema de sombra con poró se observa casi una duplicación de la reserva en biomasa (valor a 10 años = 1,61 del valor a cinco años). En el caso del mismo nitrógeno del sistema cacao/laurel se ratifica un aumento casi similar en el segundo quinquenio de estudio (valor a 10 años = 1,71 del valor de cinco años). Los resultados implican que la acumulación de elementos especialmente nitrógeno, en la fitomasa y con ello de absorción de elementos nutritivos dentro del lapso de estudios no es lineal sino elipsoidal. Dentro del segundo quinquenio de estudios disminuye la tasa de acumulación pues paulatinamente se logra la culminación del desarrollo de las especies de los sistemas en estudio. Beer *et al* (11, 12) han indicado que la estabilización de la cosecha de cacao es un síntoma de la culminación de esa especie. Según información sobre las tasas de desarrollo del laurel implican que esa especie disminuye su crecimiento a la edad de 10 a 15 años.

De los valores del Cuadro 5.14 se derivan los detalles de la acumulación de N en la fitomasa y su incremento en el suelo para el sistema cacao/laurel la suma correspondiente de N en la fitomasa a los cinco y 10 años corresponde a 446 y 765 kg.ha⁻¹ respectivamente. El cacao contribuyó con 22,1 y 29,2 % respectivamente, en el segundo quinquenio aumentó notablemente la reserva de N en las ramas. En los tallos de laurel aumentó en forma paralela notablemente el N en tallos 94,5 a 141 kg.ha⁻¹. La disminución del N de hojas de laurel está asociada a la época de la determinación de la fitomasa, poco después de la caducifolia de esta especie. Por ello se tiene un incremento muy notable de N en la capa de mantillo, de 76,1 a 197,6 kg.ha⁻¹ de los cinco a los 10 años.

Cuadro 5.14. Reservas de nitrógeno acumuladas en la biomasa y el suelo de los sistemas cacao con laurel y cacao con poró (kg.ha⁻¹; según Alpizar et al 3; Beer et al, 11, 12; Fassbender et al, 40, 44 y valores provisionales aún no publicados).

	Cacao con laurel		Cacao con poró	
<u>Edad 5 años</u>				
Hojas		95,1	58,8	50,7
Ramas	55,8	43,1	31,5	55,4
Tallos	32,7	94,8	12,5	50,3
Raíces finas	10,3			
Mantillo		38,5		22,0
Subtotal		76,1		111,5
vegetación		446,4		392,7
Suelo (inicial, 1977)		7991		9555
Total en sistema		8437,4		9947,7
<u>Edad 10 años</u>				
Hojas		33,6	66,5	54,8
Ramas	68,9	70,2	159,0	44,8
Tallos	134,1	141,1	23,2	106,8
Raíces finas	20,4			
Mantillo		99,3		62,6
Subtotal		197,6		204,0
vegetación		765,2		721,7
Suelo (9 años, 1986)		8969		10964
Total en sistema		9734,2		11685,7

La capa de mantillo es una reserva transitoria de elementos nutritivos; los residuos vegetales se encuentran en los procesos de mineralización y humificación; los valores encontrados dependen de la época de la determinación y la fenología de las plantas. A la edad de 10 años la asociación cacao con poró ($204,0 \text{ kg.ha}^{-1}$) sobrepasó ligeramente aquí también el cacao con laurel $197.6 \text{ (kg N.ha}^{-1}\text{)}$.

Las reservas en el suelo mineral son elevadas y representan para la asociación con laurel el 95 y para la asociación con poró el 92 % del total del sistema. Las cantidades absolutas de N en el suelo al inicio del experimento (1977) difieren notablemente entre los sistemas (7991 y $9555 \text{ kg N.ha}^{-1}$), ello debido al manejo de los suelos antes del experimento.

Los valores de las cantidades de nitrógeno acumuladas en los frutos se presentan en las Figuras 5.7 y 5.8 entre paréntesis. Con ello se trata de simbolizar que este valor corresponde a las cantidades totales anuales extraídas del sistema. En el caso del cacao la biomasa de frutos es muy dinámica, los frutos maduros se cosechan cada dos semanas; la floración, fructificación y madurez son un proceso continuo.

En el Cuadro 5.15 se han agrupado los resultados del análisis del nitrógeno y otros elementos nutritivos en los diferentes compartimentos de la vegetación que se muestrearon en las trampas colectoras de residuos vegetales (ver Capítulo 4.4.3). La disminución de las concentraciones del nitrógeno de los órganos vivos (Cuadro 5.13) a la hojarasca muerta (Cuadro 5.15) es notable; en el caso de las hojas del cacao por ejemplo disminuyó de 1,82 a 1,15 %, para el poró de 3,10 a 2,64 % respectivamente. Ello implica que antes de la caída de las hojas se produce un efecto fisiológico de la reabsorción de elementos nutritivos en las yemas vegetativas de las plantas. Por otro lado es necesario indicar que el muestreo de los residuos vegetales se realizó semanalmente, así en los días intermedios se puede producir el lavaje de los elementos nutritivos.

En el Cuadro 5.16 se presenta el valor de la transferencia de elementos nutritivos con los residuos vegetales, en función de cinco años de mediciones. En los residuos naturales el sistema de cacao con poró ($198,4 \text{ kg N.ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) sobrepasa notablemente al sistema de cacao con laurel ($128,9 \text{ kg N.ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$). En la Figura 5.9. se observan las variaciones del contenido de nitrógeno en las hojas de residuos de cacao, poró y laurel durante cuatro años de estudios (63). El contenido de N en las hojas de cacao con promedios con poca variabilidad de 1,31 y 1,41% bajo laurel y poró indica una influencia del árbol leguminoso.

Cuadro 5.15. Contenido de elementos nutritivos en los residuos vegetales (%) para los sistemas cacao con laurel y cacao con poró (según Alpizar *et al.*, 3; Heuveldop *et al.*, 61).

Elemento	Cacao		Laurel	
	Hojas	Ramas	Hojas	Ramas
N	1,15	0,90	2,12	1,31
P	0,15	0,26	0,28	0,12
K	0,80	1,15	1,18	0,60
Ca	1,66	1,33	2,08	1,04
Mg	0,67	0,70	0,81	0,54

Elemento	Cacao		Laurel	
	Hojas	Ramas	Hojas	Ramas
N	1,35	1,42	2,64	1,31
P	0,07	0,18	0,15	0,09
K	0,68	1,45	0,51	0,72
Ca	1,74	1,64	1,90	0,97
Mg	0,71	0,46	0,48	0,75

Los valores de N de hojas de laurel (promedio 2,20%) y poró (promedio 2.91%) son más variables y muy diferenciados en favor del árbol leguminoso. De los resultados presentados en el Cuadro 5.16 se desprende que existen, sin embargo, diferencias notables en los procesos internos de transferencia con los residuos vegetales dentro de los sistemas en estudio. Generalmente el sistema cacao/poró por lo menos duplica los valores del sistema cacao/laurel. Aquí hay que hacer hincapié en el valor de N, el cual alcanza su valor de 412 y 173 kg ha⁻¹.a⁻¹ para cacao bajo sombra de *E. poeppigiana* y laurel respectivamente. La explicación lógica para esta diferenciación está ligada a la fijación de N por el árbol leguminoso y el manejo de las podas con una reducción notable de la biomasa aérea foliar la cual pasa a la capa de mantillo.

La importancia de este proceso se interpreta con la humificación y mineralización de los residuos vegetales; en base a los resultados sobre la descomposición de los residuos en un ciclo anual se puede esperar que la tasa de deposición de los elementos químicos es comparable a la de liberación en el suelo mineral.

Cuadro 5.16. Transferencia de nitrógeno con residuos en los sistemas de cacao con árboles de sombra de laurel. Quinquenio 1982-87 (kg N.ha⁻¹.a⁻¹) (Imbach et al., 62).

Sistema y Componente	RESIDUOS NATURALES edad de los sistemas años					PROMEDIO	PODAS 9 - 10 años PROMEDIO	TOTAL
	6	7	8	9	10			
Cacao/Laurel								
Cacao	38,6	58,8	66,9	51,8	64,3	56,1	40,1	96,2
Laurel	54,7	62,8	75,5	91,0	80,3	72,9	-	72,9
TOTAL	93,3	121,6	142,4	142,8	144,6	128,9	40,1	169,0
Cacao/Poró								
Cacao	41,7	48,8	68,4	53,4	51,3	52,7	60,7	113,4
Poró	162,4	173,2	142,4	151,6	98,6	145,6	188,1	333,7
TOTAL	204,1	222,0	210,8	205,0	149,9	198,4	248,8	447,1

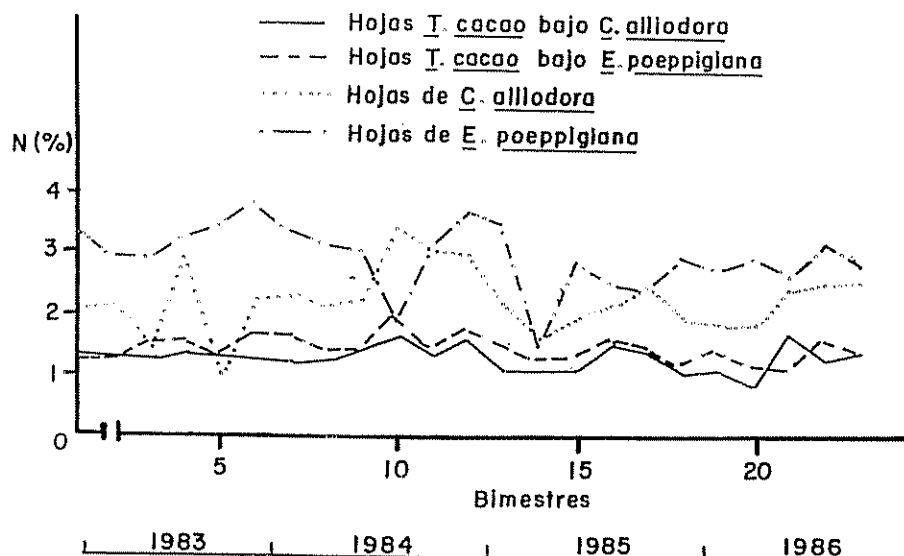


Figura 5.9. Variación y promedio del contenido de nitrógeno en las hojas de los residuos de cacao, laurel y poró. (porcentaje, según Imbach *et al.*, 1991).

La interpretación de la importancia de la transferencia de N y de los demás elementos nutritivos con los residuos vegetales puede basarse en su comparación con las acumulaciones en la biomasa y la exportación con las cosechas. Así se pueden obtener los siguientes valores e índices de interpretación (Cuadros 5.15, 5.14, Figuras 5.7 y 5.8):

	Cacao con laurel	Cacao con poró
Residuos (kg ha ⁻¹ .a ⁻¹)	169,1	447,1
Biomasa (kg ha ⁻¹ .a ⁻¹)	606,0	557,5
% Reciclaje	27,9	80,2

Los valores implican que para el sistema de cacao con laurel el 28 % de la biomasa circula anualmente dentro del mismo; en el caso del cacao con poró el valor es más alto (80%) e implica una aceleración del ciclo del nitrógeno.

En base a la observación de que la capa de mantillo de los sistemas en estudio es más o menos constante (3, 40, 41, 61) se ha postulado que el nitrógeno es mineralizado en el transcurso del año de su deposición sobre el suelo (Figuras 5.7 y 5.8).

En estudios específicos (62) se determinó el N que ingresa al sistema con el agua de lluvias, se registró un promedio de 5,0 kg N.ha⁻¹.a⁻¹. Usando cápsulas lisimétricas se muestreó el agua percolante de los sistemas en estudio (62); con base en el balance hídrico y el contenido de N en el agua lixivante se obtuvieron valores de 5,6 y 5,7 kg N.ha⁻¹.a⁻¹ para cacao/poró y cacao/laurel respectivamente.

En el Cuadro 5.17 se han resumido los valores de las cosechas promedio de los sistemas en estudio durante el quinquenio de seis a 10 años y las cantidades de elementos exportados anualmente de los mismos. Se trata así de valores promedios a largo plazo; aquí es necesario indicar que la cosecha de cacao ha aumentado gradualmente con la madurez de la plantación (Cuadro 4.27). Para expresar la cosecha de cacao generalmente se utiliza el valor del peso seco de cosecha de semillas (31); con los promedios anuales de los sistemas de cacao con laurel de 1028 y de cacao con poró de 1054 kg M.S. ha⁻¹.a⁻¹, se tienen valores relativamente altos (27). Sin embargo es necesario indicar que se trata de parcelas experimentales y así se tiene un manejo del cacao que es más favorable que en condiciones de fincas.

Cuadro 5.17. Cosecha (t.ha⁻¹.a⁻¹), contenido (kg.t⁻¹) y remoción de elementos nutritivos (kg.ha⁻¹.a⁻¹) en los sistemas de cacao con laurel y cacao con poró (promedio de seis a 10 años, según Heuvel dop *et al.*, 61; Fassbender *et al.*, 40, 41).

	M. Seca kg.ha ⁻¹ .a ⁻¹	N kg.t ⁻¹	P kg.ha ⁻¹ .a ⁻¹	K	Ca	Mg
Cacao con laurel						
Semilla	1028	14,4 19,9	4,6 4,7	10,8 11,1	1,3 1,3	3,4 3,5
Cáscara	1489	8,3 12,4	1,3 1,9	24,8 36,9	5,2 7,7	2,5 3,7
Total	2517	32,3	6,6	48,0	9,0	11,2
Cacao con poró						
Semilla	1054	21,4 22,6	4,2 4,4	10,6 11,1	1,3 1,4	3,1 3,3
Cáscara	1488	10,3 15,3	1,3 1,9	19,0 28,3	5,8 8,6	2,2 3,2
Total	2542	37,9	6,3	39,4	10,0	6,5

El contenido de nitrógeno de las semillas y las cáscaras de los frutos en el sistema cacao con poró alcanzaron un valor de 21,4 y 10,3 kg N.t⁻¹, en el sistema con laurel el valor respectivo fue 19,4 y 8,3 kg N.t⁻¹ respectivamente. Los valores son representativos del valor promedio presentado por Fassbender (35, ver también 105) al evaluar la información disponible en la literatura con promedios de 21,6 y 13,7 kg N.t⁻¹ respectivamente.

Para la interpretación de la remoción de elementos nutritivos pueden observarse como fue indicado anteriormente, sus relaciones con la acumulación en la biomasa y o su reciclaje con los residuos, así también como la fertilización aplicada. Al comparar las reservas en la biomasa (promedio cinco y 10 años) y las cosechas (seis a 10 años).

	Cacao con laurel	Cacao con poró
Biomasa (kg ha ⁻¹ .a ⁻¹)	606,0	557,5
Cosechas (kg ha ⁻¹ .a ⁻¹)	32,7	37,9

La exportación de N con las cosechas representa así 5,4 y 6,8 % para los sistemas de cacao bajo laurel y poró respectivamente; así las pérdidas de N son relativamente pequeñas.

Al comparar los valores de N de las cosechas con el reciclaje con los residuos vegetales se obtienen los siguientes valores (Cuadro 5.15, 5.17):

	Cacao con laurel	Cacao con poró
Cosechas (kg ha ⁻¹ .a ⁻¹)	32,7	37,9
Residuos (kg ha ⁻¹ .a ⁻¹)	169,1	447,1
% Reciclaje	5,2	11,8

El reciclaje de N sobrepasa a la exportación, siendo 5,2 y 11,8 veces mayor para el sistema de sombra de laurel y poró respectivamente. Así el reciclaje mantiene la dinámica del ciclo del nitrógeno, el cual no es afectado por la cosecha relativamente pequeña.

Finalmente es necesario indicar que la fertilización nitrogenada inicialmente ha sido variable en los diferentes años, a partir del sexto año se ha estabilizado en 87,5 kg N.ha⁻¹.a⁻¹, así es bastante elevada en comparación con la remoción con la cosecha.

En algunos trabajos (5, 59) se ha indicado que las cáscaras de los frutos de cacao pueden dejarse en el campo y así son una fuente de reciclaje de los elementos nutritivos. Para aclarar su importancia sería conveniente observar los valores correspondientes en el Cuadro 5.17. En las cáscaras se almacenan 38 y 40 % del N removido por las cosechas totales en los sistemas bajo laurel y poró respectivamente.

Con los valores obtenidos en los estudios del nitrógeno en los sistemas agroforestales en estudio, además de los modelos discutidos es posible hacer un balance completo del nitrógeno a partir del suelo a los 10 años experimentales. Para ello es necesario considerar todos los procesos de transferencia en forma acumulativa durante ese período experimental. En el Cuadro 5.18 se han resumido los valores de las ganancias o pérdidas en los sistemas. De ello se desprende que no existen mayores diferencias entre los sistemas, los cuales alcanzaron los siguientes valores ($\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 10 \text{ a}^{-1}$):

	Cacao laurel	Cacao poró
Ganancias	1112	1112
Pérdidas	1039	1014

La diferencia en las reservas de nitrógeno del suelo sin embargo son las siguientes ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, 0-45 cm suelo):

	Cacao/laurel	Cacao/poró
Inicio	7991 ± 901	9555 ± 895
A 10 años	8969 ± 1384	10964 ± 902
Diferencia/Ganancia	+ 978	+ 1409

Las diferencias de reservas de N en el suelo no son estadísticamente significativas. Así una interpretación de la fijación de nitrógeno para el árbol leguminoso ($431 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 10 \text{ a}^{-1}$) en base a la diferencia con el árbol leguminoso es solamente hipotética. Ello implica sin embargo una fijación de N promedio de $40 \text{ ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$.

En la mayor parte de los trabajos sobre las ventajas de los sistemas agroforestales, en los cuales se usan especies leguminosas, se hace hincapié en la importancia de la fijación de nitrógeno (3, 4, 7, 8, 10, 11, 37, 38, 39, 40, 75, 83, 84, 89, 118, 119).

Cuadro 5.18. Ganancias y pérdidas de N del suelo en los sistemas agroforestales de cacao/laurel y cacao/poró en 10 años experimentales ($\text{kg N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 10 \text{ a}^{-1}$) (según valores de Alpizar *et al.*, 3, Beer *et al.* 10, 11; Fassbender *et al.* 40, 41, 42; Imbach *et al.*, 62, 63 y valores provisionales aún no publicados).

	Cacao/laurel	Cacao/poró
GANANCIAS		
N en lluvias	50	50
Fertilizante	962	962
TOTAL	1112	1112
PERDIDAS		
Acumulación árboles de sombra	244,9	206,4
Acumulación cultivar	223,4	248,7
Rafces finas	99,3	62,6
Mantillo	197,6	204,0
Subtotal vegetación	765,2	721,7
Cosechas	217,7	235,8
Lixiviación	56,0	57,0
TOTAL	1038,9	1014,5

Para poder interpretar la fijación de N en los sistemas en estudio se han recolectado muestras de agua del suelo que se pueden asociar con las formas del N del suelo, sus procesos de cambio y de fijación de N. Estos aspectos se discuten en detalle en los próximos acápite.

Según análisis de Martínez y Blasco (87) sobre las formas de N en suelos de esta serie, el 97,6% del N es orgánico, dentro del cual los aminoácidos y los aminoazúcares representan el 25,1 y el 4,2% respectivamente. Los valores de NH_4^+N y NO_3^-N solubles (NaCl 1 N) representan 2,4 y 0,4% del N-total respectivamente. A partir de estas fracciones de N y en función de los procesos de mineralización, intercambio, fijación de N en el suelo y la adición con las aguas de lluvia aparecen cantidades variables de N en la solución del suelo. En el experimento se han tomado muestras de agua con lisímetros de las

profundidades 0-15 y 15-30 cm a distancias de 0,5 y 1,0 m de los tallos del poró; los análisis químicos (N-total, $\text{NO}_3^- \text{N}$ y $\text{NH}_4^+ \text{N}$) deberían representar las variaciones estacionales del N en el suelo. Los valores disponibles indican un aumento de estas concentraciones después de las épocas secas (febrero a mayo), coincidiendo con las semanas después de las podas (Figura 5.10). Aparentemente el efecto de la dilución del suelo con las lluvias regula en primer lugar el contenido de N en la solución del suelo, como el encontrado por Fassbender (ver Fassbender y Bornemisza, 37) en otros suelos de Costa Rica, bajo diferentes condiciones ecológicas y bajo diferentes cultivos.

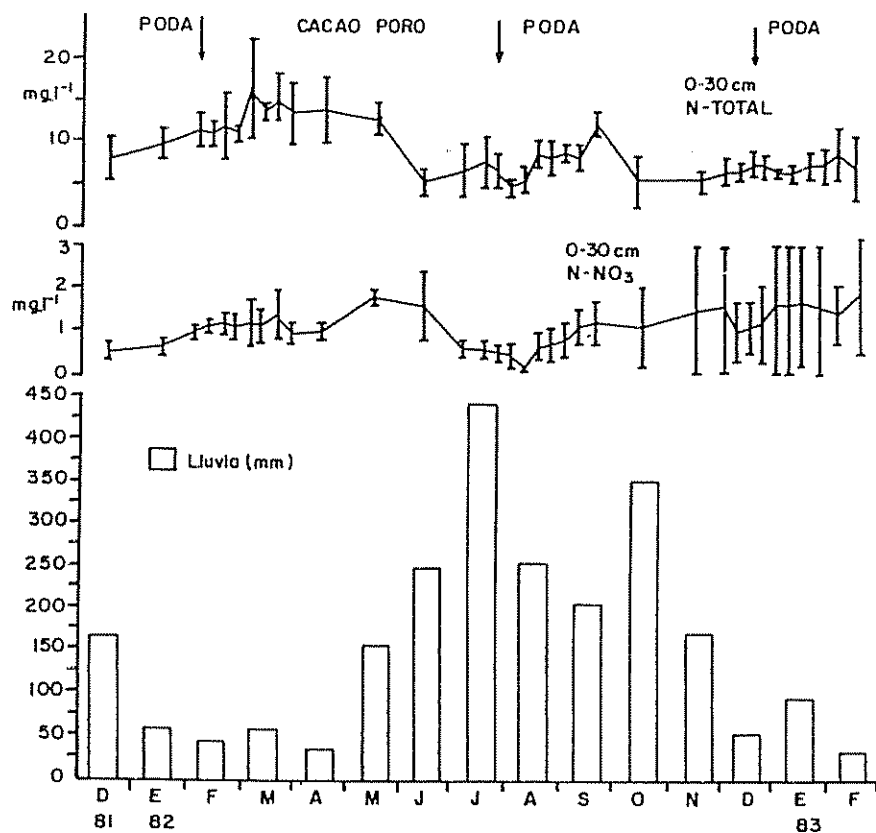


Figura 5.10. Variaciones de N-total y $\text{NO}_3\text{-N}$ en el agua del suelo en función de la poda del poró y las lluvias (mg.l^{-1} ; según Alpizar, 3; Fassbender *et al*, 40).

En una fase posterior del experimento se agruparon las cápsulas lisimétricas alrededor de árboles seleccionados de poró y laurel a fin de comparar los valores de N-total de la solución del suelo. Muestras

semanales de agua se mezclaron con muestras mensuales que fueron analizadas. Los promedios del Cuadro 5.19 se refieren a 20 cápsulas lisimétricas de 0 a 30 cm, distribuidas en las dos profundidades escogidas. La interpretación de los resultados es sui generis; en la zona radicular del árbol leguminoso se observan valores más altos de N que del árbol no leguminoso, las concentraciones correspondientes alcanzan 23,2 y 9,3 mg N.l⁻¹ respectivamente. Ellos implican que la diferencia se debe a los procesos de fijación de N de Erythrina.

Cuadro 5.19. Concentración de nitrógeno en el agua del suelo de los árboles de sombra (laurel y poró) del cacao (N total, mg.l⁻¹; según Fassbender et al, 40).

Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Promedio -año
<u>0-30 cm de profundidad del suelo</u>												
<u>Poró</u>												
10,7	8,6	17,1	28,9	39,3	63,9	41,4	24,7	11,4	11,4	15,7	5,7	8,2
<u>Laurel</u>												
7,9	5,6	8,2	15,4	15,4	17,1	14,6	13,8	2,9	1,4	5,4	3,6	9,3
<u>0-15 cm profundidad del suelo</u>												
<u>Poró</u>												
12,1	8,6	16,4	35,7	42,1	75,0	54,5	26,0	9,3	10,7	19,3	7,9	26,5
<u>Laurel</u>												
10,0	6,0	10,0	9,3	15,0	18,6	10,0	11,3	3,6	1,2	11,4	5,0	9,3
<u>15-30 cm profundidad del suelo</u>												
<u>Poró</u>												
9,3	8,6	17,9	22,1	36,4	52,9	28,5	23,4	13,6	12,4	12,1	3,6	20,1
<u>Laurel</u>												
5,7	6,2	6,4	21,4	15,7	15,7	19,0	16,3	2,2	1,6	5,0	2,2	9,7

La interpretación ecológica de las diferencias para estimar la tasa de fijación de N es difícil, ya que las interacciones del ciclo del agua (Capítulo 3.4.3) no son completas. Para ello son necesarios aún estudios más detallados.

Cacao (Theobroma cacao) con leguminosas en Monasterio, Ocumare, Venezuela.

En la Figura 5.11 se presenta el modelo del nitrógeno de una plantación adulta de cacao (30 años, variedad criollo morado, 960 árboles.ha⁻¹) bajo sombra de leguminosas en Monasterio, Ocumare, Venezuela publicado originalmente por Aranguren *et al* (5, ver también Herrera *et al*, 59). Los árboles de sombra encontrados fueron Castilloa elastica, Erythrina spp. y Artocarpus altilis en una densidad de 570 árboles por hectárea. El sitio experimental a una altura de 12 msnm presenta una temperatura promedio anual de 25°C y una precipitación pluvial anual de 740 mm; el suelo de tipo Psament es de origen aluvial.

La acumulación de nitrógeno en la biomasa del cacao alcanzó 302 kg.ha⁻¹, de los cuales prácticamente la mitad se encontraron en las ramas y tallos. Para la determinación del N en las raíces se excavaron varios árboles de cacao para determinar previamente la biomasa correspondiente. La mayor reserva de nitrógeno determinada se encontró en el suelo, alcanzando en una profundidad de 60 cm un total de 34520 kg N.ha⁻¹. Las reservas de N en los árboles de sombra no son conocidas; solamente las concentraciones de N en las hojas y ramas (Figura 5.11). Los valores encontrados para Castilloa elastica (29,8 y 17,5 kg N.t⁻¹ para hojas y ramas) son sorprendentemente altos.

La cosecha del cacao equivale a 20 y 25 kg.ha⁻¹.a⁻¹ para el pericarpio y las semillas respectivamente. Los residuos de cosecha (cáscaras) quedan en el campo y así retornan al suelo los 20 kg.ha⁻¹.a⁻¹ extraídos. En los residuos vegetales se encontraron 66 kg.ha⁻¹.a⁻¹ como frutos que se están perdiendo de las cosechas.

El total del nitrógeno de reciclaje alcanzó 320 kg.ha⁻¹.a⁻¹, de los cuales la mayor parte (207 kg.ha⁻¹.a⁻¹) proviene de los árboles de sombra. Así la circulación de nitrógeno sobrepasa la acumulación en la fitomasa del cacao y se tiene un índice de reciclaje muy elevado. La mineralización de los residuos es rápida, en el transcurso de cuatro meses desaparecen los materiales expuesto en bolsas de descomposición. En la época de sequía se observaron cambios notables en los microorganismos transformadores del nitrógeno en el suelo, especialmente de las bacterias Nitrosomonas y Nitrobacter.

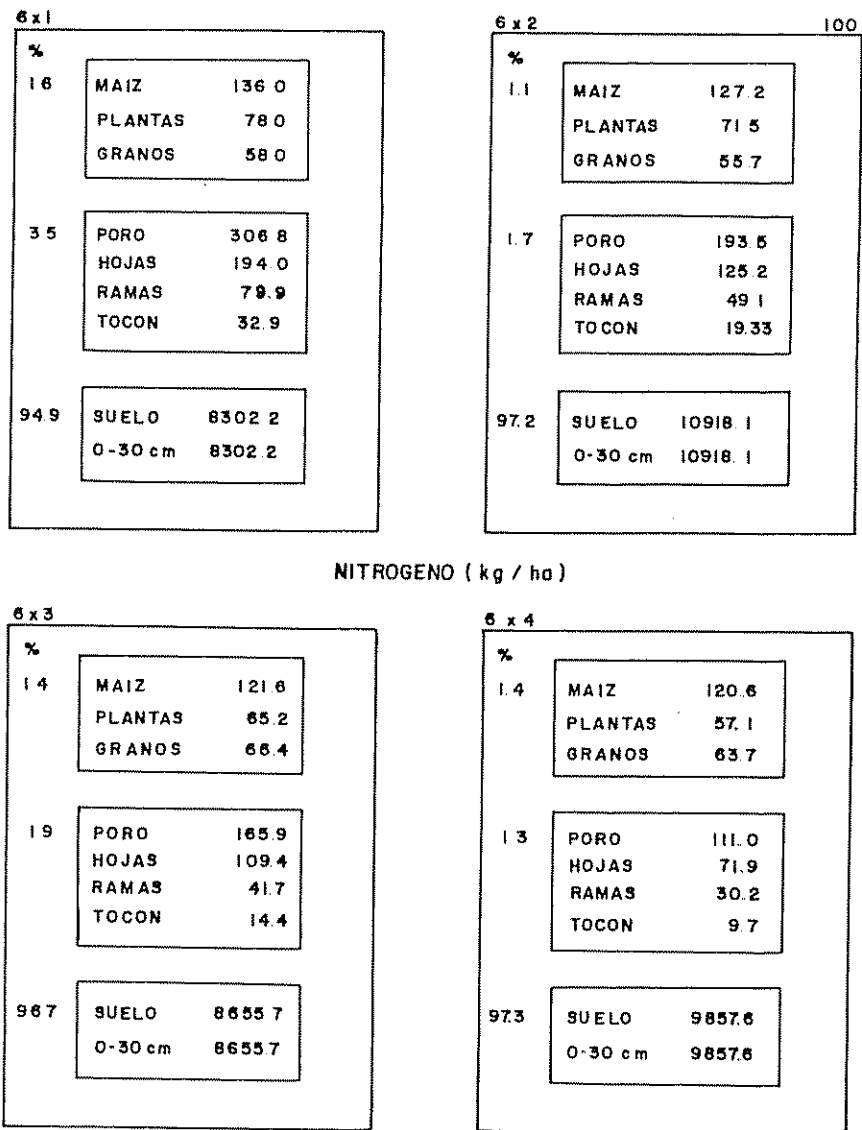


Figura 5.11. Reservas y transferencia de N en el experimento de cultivo de maíz en callejones de poró (*Erythrina poeppigiana*) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en CATIE, Costa Rica (Sánchez, 102).

5.4.4. Plantas de cobertura bajo árboles

Plantas forrajeras bajo caucho (hule, Hevea brasiliensis)

El caucho (hule, Hevea brasiliensis) es originario de la región amazónica del Brasil. Después de su introducción en Malaya, hace un siglo, ha tomado mucha importancia en ese país donde se produce 92% del total mundial (88).

Las plantaciones de caucho a distanciamientos de generalmente 4,5 x 4,5 m permiten el desarrollo de cultivos intercalados en la fase inicial del crecimiento de los árboles, antes de su fase de producción (sangrado). Según Nair (88) son frecuentes cultivos de cobertura con Calopogonium muconoides, Centrosema pubescens y Pueraria phaseoloides.

La información disponible sobre el ciclo de los elementos nutritivos en sistemas agroforestales de plantas forrajeras con hule ha sido obtenida por el Instituto Malayo de Investigación de Caucho (Rubber Research Institute of Malaysia) y resumida en los Cuadros 5.20 y 5.21. Los resultados se refieren a los primeros seis años de la plantación, en los cuales los árboles de caucho aún no alcanzan el grosor para el sangrado o producción de caucho. La acumulación de nitrógeno y de los otros elementos nutritivos es paulatina, a la edad de seis años se registraron 728 kg N.ha⁻¹ en los árboles. Las plantas intercaladas de cobertura alcanzaron a la edad de seis años una biomasa total de 21,5 t.ha⁻¹ en la cual se acumularon 335 kg N.ha⁻¹. Dentro de las leguminosas rastreras se registraron Pueraria phaseoloides, Centrosema pubescens, Calopogonium muconoides; dentro de las gramíneas Axonopus compressus y Paspalum conjugatum; en la vegetación típica se presentan además Mikania cordata y otros arbustos nativos naturales. La acumulación de N en la fitomasa representa una porción pequeña del N total encontrado originalmente en el suelo, el cual varía 4600 y 11540 kg N.ha⁻¹.

Durante este período de desarrollo del caucho, las plantas de cobertura especialmente las leguminosas, juegan un papel importante de protección del suelo e incorporan cantidades importantes de residuos que son rápidamente descompuestas en función de su relación favorable de C/N. El reciclaje de N durante los seis años de observaciones se ha sumariado en el Cuadro 5.21.

Cuadro 5.20. Contenido de elementos nutritivos en el sistema plantas de cobertura con caucho (*Hevea brasiliensis*) en Malasia (kg.ha⁻¹; según RRIM - Planter's Bulletin, 100).

Arboles de caucho Edad (años)	Nº de árboles por hectárea	N	P	K	Mg
-----kg.ha ⁻¹ -----					Mg
1	445	12	1	7	7
2	445	72	7	41	14
3	445	150	14	58	20
4	408	350	30	187	63
6	346	728	64	311	119
10	296	1529	143	510	241
24	272	1681	224	950	393
33	267	1779	276	1233	417
Plantas de cobertura Materia seca					
	t.ha ⁻¹				
Leguminosas rastreras	6,0	140	11	31	19
Gramíneas	6,1	63	9	31	16
Mikania cordata	4,1	68	7	23	16
Naturales (mezcla nativas)	5,4	64	6	42	17
Series de suelos (0-50 cm)					
Rengan	4730	757	1339	530	
Durian	6798	990	10590	2000	
Kuantan		8250	5709	807	1900
Selangor		11638	1800	11897	14670
Sungei Buloh		4598	774	886	490

Cuadro 5.21. Transferencia de elementos nutritivos en el sistema plantas de cobertura - caucho en Malasia ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 5\text{a}^{-1}$; según Rubber Research Institute of Malaysia, 100).

	N	P	K	Mg
	-----kg/ha-----			
Piantas de cobertura				
Leguminosas rastreras	226 - 353	18 - 27	85 - 131	15 - 27
Gramíneas	24 - 65	8 - 16	31 - 86	9 - 15
<u>Mikania</u>	74 - 119	9 - 14	63 - 99	9 - 24
Naturales (nativas)	13 - 117	3 - 10	46 - 140	3 - 18
Raleo de árboles de caucho	122	10,5	56	20,5
Agua de lluvia (año)	20	0,2	12	3
en 5 años	100	1,0	60	15

Durante este período los residuos de los árboles de caucho son pequeños y no han sido registrados. A la edad de cuatro a seis años generalmente se hace un raleo de los árboles, generalmente de 100 por hectárea. Así retornan al suelo 122 kg N.ha.

Con base en valores obtenidos en Malasia de la deposición de elementos nutritivos con el agua de lluvia se pueden calcular los ingresos atmosféricos de elementos nutritivos presentados en el Cuadro 5.21.

En la fase de madurez y explotación (sangrado) de los árboles de caucho no son factibles cultivos asociados o intercalados; así se tiene la transformación del sistema agroforestal al sistema de explotación monocultural de caucho.

5.4.5. Sistemas de praderas bajo árboles de sombra

- Pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*) bajo laurel (*Cordia alliodora*) y poró (*Erythrina poeppigiana*)

Los aspectos generales sobre este sistema, estudiado en el Experimento Central del CATIE, Turrialba, Costa Rica, han sido descritos anteriormente (ver Capítulo 3.4.3; 4.4.4). El estudio de los ciclos de los elementos nutritivos implica por un lado su determinación en los diferentes compartimentos del sistema y multiplicándolos con las reservas de materia seca se obtienen las reservas nutritivas acumuladas; por otro lado es necesario conocer sus transferencias las

cuales se calculan igualmente multiplicando la concentración y la masa de materia (residuos, cosechas, agua, etc.).

De acuerdo con Alpízar (2) las reservas de N acumuladas en la vegetación se resumen de la siguiente manera ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$):

	Pasto estrella bajo laurel	Pasto estrella bajo poró
Biomasa en pie	355	174
Raíces finas	41	13
Capa mantillo	40	42
Suma	436	229

La producción del pasto estrella se estudió durante los primeros cuatro años experimentales (1979-1982) en la primera fase donde se aplicaron fertilizantes (Alpízar, 2), en los dos años subsiguientes (1983-1984) se continuó la medición aunque el pastizal había sido invadido por muchas malezas (Bronstein, 17).

En el Cuadro 5.22 se han resumido los resultados del análisis químico de los elementos nutritivos en el pasto estrella. El contenido de nitrógeno fue mayor en los sistemas bajo sombra que en pasto sin sombra; la influencia de la leguminosa de sombra se observa claramente en el valor de $1,81 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$. En función de la producción (Cuadro 4.36) y del contenido de N se pueden calcular los siguientes valores de exportación de N del sistema ($\text{kg} \cdot \text{ha} \cdot 4 \text{ a}^{-1}$):

	Materia seca $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 4 \text{ a}^{-1}$	Contenido N $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	Exportación $\text{kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 4 \text{ a}^{-1}$
Pasto sólo	67,7	9,5	643,1
Pasto bajo laurel	46,9	15,6	731,6
Pasto bajo poró	72,9	18,1	1319,5

Cuadro 5.22. Contenido de elementos nutritivos en pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*) sin sombra y bajo sombra de laurel y poró en Turrialba, Costa Rica (porcentaje; según Alpízar, 2).

	Literatura	Bajo poró	Bajo laurel	Sin sombra
N	0,66 - 2,36	1,81	1,56	0,95
P	0,09 - 0,41	0,22	0,31	0,23
K	1,26 - 3,10	1,00	1,32	1,02
Ca	0,25 - 0,58	0,62	0,53	0,53
Mg	0,21 - 0,29	0,13	0,16	0,12

Con los resultados obtenidos se puede hacer un balance del nitrógeno de los sistemas en estudio con los siguientes valores (Alpízar, 2):

	Pasto estrella bajo laurel	Pasto estrella bajo poró	Pasto sólo
Ganancias			
Lluvia y fertilizante	84	69	84
Vegetación en pie	436	229	--
TOTAL	520	298	84
Pérdidas			
Madera, raleos	40	---	--
Pasto	732	1320	643
TOTAL	172	1320	643
Balance	-252	-1022	-559

Las pérdidas por lixiviación con el agua freática no han sido estudiadas. Con ellas se agravan las exportaciones de N de los sistemas y así se está produciendo un agotamiento progresivo de las reservas del suelo.

- "King grass" (Pennisetum purpureum x P. typhoides) bajo sombra de poró (Erythrina poeppigiana).

Este estudio fue realizado igualmente en la región de Turrialba, en los campos experimentales del CATIE (97, ver Cap. 4.4.4). Por un lado se ha estudiado la remoción de elementos nutritivos con las podas del poró y por otro su exportación con las cosechas del pasto (97).

En el Cuadro 5.23 se presentan los resultados obtenidos sobre la remoción de elementos nutritivos en 1984 con la cosecha del poró. El material cosechado se saca de las parcelas y así representa una exportación de elementos nutritivos. Las hojas y los tallos tiernos se consideran como comestibles, ya que pueden ser utilizados para la alimentación del ganado, y totalizan $230 \text{ kg N.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$. El total exportado alcanza $270 \text{ kg N.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$. El valor correspondiente de cosecha del pasto "king" bajo la sombra del poró alcanzó $174 \text{ kg N.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$. El "king-grass" sin sombra extrajo en el año en estudio $151 \text{ kg N.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$.

Los detalles de los años experimentales (1983 y 1984) se pueden observar en el Cuadro 5.22. La suma total de N para "king-grass" bajo sombra de poró en los años experimentales es de $943 \text{ kg ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$, en comparación el "king-grass" solo alcanzó $328 \text{ kg ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$.

La reserva de N en el suelo al inicio del experimento calculada a una profundidad de 20 cm, en $5200 \text{ kg N.ha}^{-1}$ (97). Así se puede indicar que el sistema agroforestal es bastante exhaustivo, extrayendo en dos años 17 % de las reservas del suelo. Sin embargo se ha puntualizado que el total de N en el suelo aumentó después de dos años a 6000 kg.ha^{-1} ; ello implica que con la mortalidad de las raíces (residuos vegetales) se acumula N, el cual lógicamente es removido de otras profundidades del suelo.

Cuadro 5.23. Elementos nutritivos extraídos por podas del poró (*Erythrina poeppigiana*) ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; en 1984; según Rodríguez, 97).

	N	P	K	Ca	Mg
Hojas	207	11	55	46	14
Tallo tierno	22	2	16	7	2
Tallo leñoso	40	2	19	9	4
Biomasa comestible	230	13	85	53	16
Biomasa total	270	15	104	62	20

Cuadro 5.24. Remoción de elementos nutritivos por los sistemas de "king-grass" con y sin sombra de poró en Turrialba, Costa Rica ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; según Rodríguez, 97).

Año		N	P	K	Ca	Mg
1983	Poró	227	14	76	52	18
	"King grass"	272	86	477	62	57
	Suma	499	100	553	114	75
	"King grass" sólo	177	77	450	54	44
1984	Poró	270	16	91	61	21
	"King grass"	174	56	305	40	36
	Suma	444	72	396	101	57
	"King grass" sólo	151	59	345	42	34
TOTALES ACUMULADOS						
1983	Poró	497	30	167	113	39
+	"King grass"	446	142	782	102	93
1984	Suma	943	172	949	115	132
	"King grass" sólo	328	136	795	96	78

5.4.6. Sistemas de cultivo en callejones ("alley cropping")

En la sección 2.6.6 se han presentado los aspectos relacionados con los cultivos en callejones, especialmente sobre la producción de los cultivos intercalados (yuca, maíz, frijoles y las especies leguminosas de los callejones, 7, 10, 75, 83, 84, 109). La ventaja de las especies arbóreas es obvia por la fijación de nitrógeno y el reciclaje de todos los elementos nutritivos. En el experimento de cultivos de callejones en el CATIE de acuerdo con Kass *et al* (75), los callejones de *Erythrina poeppigiana* y de *Gliricidia sepium* a la edad de seis años han acumulado 209 y 203 kg.ha⁻¹ respectivamente. Los resultados de la acumulación de N en el mismo experimento en función de la distancia de árboles de poró (distancia entre callejones 6 m, distancia entre árboles 1, 2, 3 y 4 m) y del maíz intercalado se puede observar en la Figura 5.11. Lógicamente se observa una disminución del N en la biomasa del poró en función de la disminución del número de árboles por callejón o hectárea. El N acumulado en las plantas de maíz es más o menos constante, equivalente de 120 a 136 kg N.ha⁻¹ (Sánchez, 102). En el otro experimento sobre sistemas agroforestales de cultivos en callejones Sánchez (102) registró los siguientes valores de acumulación de N (kg.ha⁻¹):

	Sin fertilización nitrogenada	Con fertilización nitrogenada
Poró-árbol	424,7	276,2
Maíz	84,7	104,8
Frijol	50,3	56,7
Suelo (0-40 cm)	9696,0	10671,3
<i>Gliricidia</i> -árbol	573,2	781,4
Maíz	91,0	94,8
Frijol	48,3	58,8
Suelo	9830,7	9167,3

En ambos experimentos la mayor reserva de N-total se encuentra en el suelo. Generalmente la acumulación de N en la biomasa se encuentra en el tallo, especialmente cuando se ha aplicado fertilizante nitrogenado.

La tasa de transferencia de elementos nutritivos de callejones de *Cassia siamea* a la edad de dos y tres años en un ultisol de Nigeria fue estudiada por Ghuman y Lal (46). La transferencia de biomasa equivale a 6,1 t.ha⁻¹.a⁻¹; el valor de nitrógeno corresponde a 113 kg

$N \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$. Sin embargo Lal (84) ha registrado que en sistemas agroforestales en callejones se observa una disminución del contenido de nitrógeno paralelo al de disminución de humus. En detalle, registró en un ultisol en Nigeria los valores del Cuadro 5.25.

Cuadro 5.25. Disminución de N-total (%) en el suelo con y sin callejones agroforestales en un ultisol de Nigeria (Lal, 84).

Sistema/ Año	Sin callejones		<u>Leucaena</u>		<u>Gliricidia</u>	
	-arado		4 m		4m	
	0-5 cm	5.10 cm	0-5 cm	5.10 cm	0-5 cm	5.10 cm
1982	0,214	0,134	0,397	0,188	0,242	0,191
1983	0,106	0,111	0,152	0,158	0,133	0,122
1984	0,081	0,070	0,173	0,126	0,128	0,102
1985	0,074	0,080	0,131	0,138	0,111	0,111
1986	0,038	0,042	0,103	0,090	0,066	0,067

La disminución del N en el suelo sin callejones agroforestales es muy severa; la transferencia de N con los residuos de los árboles leguminosos contrarrestan las pérdidas de N.

En estudios realizados en Yurimaguas, Perú, (Szott, *et al.*, 111) ha indicado que con la poda de $2,5 t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ se incorporan al suelo para Inga edulis $62 kg N \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$, para Erythrina spp. 67, Gliricidia sepium 64 y Cassia reticulata $72 kg \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ respectivamente.

Los valores obtenidos en estos pocos estudios manifiestan la importancia del reciclaje de elementos nutritivos en estos sistemas; sin embargo existe la necesidad de un mayor número de estudios y otros detalles.

RESUMEN

- Para describir al nitrógeno en el suelo se tratan su contenido y sus formas. La fracción de N-orgánico representa entre 95 y 98 % del N-total.
- Se describen los procesos de transformación de nitrógeno en los suelos; se trata el proceso de fijación de N.
- Se definen los ciclos bioquímicos, geoquímicos y biogeoquímicos de los elementos nutritivos.
- En base a los valores existentes en la literatura se describe la acumulación de nitrógeno en los ecosistemas y los procesos de transferencia.
- Como modelo del N en ecosistemas se presentan todos los detalles encontrados en el ecosistema de los bosques de "San Eusebio" en Mérida, Venezuela. Se comparan los valores con los de otros ecosistemas naturales y se discuten los parámetros de interpretación.
- Al describir al ciclo de N en agroecosistemas se presentan ejemplos de estudios integrales del nitrógeno, tratando de establecer balances. La transformación de los ecosistemas naturales en agroecosistemas de producción implica pérdidas de N. Se discuten las posibilidades de control de las pérdidas.
- En las plantaciones forestales se logra un ciclo del N muy similar al de los ecosistemas naturales. La remoción anual de N es baja.
- Se consideran en alto grado de detalle los ciclos de N en sistemas agroforestales. Los resultados para sistemas de café y cacao bajo árboles de sombra se han obtenido en el "Experimento Central del CATIE" en Turrialba, Costa Rica.
- Para describir al ciclo se presenta la información sobre a) acumulaciones en el sistema, b) reciclaje con los residuos vegetales naturales y de podas, c) cosechas agrícolas y maderables, d) ingresos con la fertilización, agua de lluvia, e) absorción por las plantas, f) fijación de N por árboles leguminosos de sombra (*Erythrina* spp.). Con los valores encontrados se preparó el modelo de N respectivo.

- Se presentan otros modelos encontrados en otros lugares y sistemas por ejemplo con caucho y plantas de cobertura.
- Para los sistemas de praderas bajo árboles de sombra se presentan modelos para pasto estrella y "king-grass".
- Se discuten algunos resultados sobre el nitrógeno en suelos bajo cultivos en callejones ("alley cropping").

LITERATURA

1. ALPIZAR, L. et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) y café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. I. Biomasa y reservas nutritivas. Turrialba (C.R.) 35:233-242.
2. _____. 1986. Results of association of pastures with shade trees at Central Experiment of CATIE. In Advances in Agroforestry Research (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. Ed. by J.W. Beer; H.W. Fassbender; J. Heuveldop. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. p. 209-215.
3. _____. et al. 1986. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with Cordia alliodora and Erythrina poeppigiana in Costa Rica. I. Inventory of organic matter and nutrients. Agroforestry Systems (Holanda) 4:231-257.
4. ARANGUREN, J. et al. 1982. Cycles of nitrogen of tropical perennial crops. I. Coffea. Plant and Soil (Holanda) 67:247-257.
5. _____. 1982. Cycles of nitrogen of tropical perennial crops under shade. II. Cacao. Plant and Soil (Holanda) 67:259-269.
6. ARNASON, J.T.; LAMBERT, D.H. 1982. Nitrogen cycling in the seasonally dry forest zone of Belize, Central America. Plant and Soil (Holanda) 67:333-342.

7. BEER, J.W.; FASSBENDER, H.W.; HEUVELDOP, J. (eds.). 1987. Advances in Agroforestry Research (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. 379 p.
8. _____. 1987. Advantages, disadvantages and desirable characteristics of shade trees for coffee, cacao and tea. *Agroforestry Systems* (Holanda) 5:3-13.
9. _____. 1988. Litter production and nutrient cycling in coffee (Coffea arabica) or cacao (Theobroma cacao) plantations with shade trees. *Agroforestry Systems* (Holanda) 7:103-114.
10. _____.; FASSBENDER, H.W.; HEUVELDOP, J. (eds.). 1989. Avances en la Investigación Agroforestal (1985, Turrialba, C.R.). Actas del seminario. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 147. 451 p.
11. _____. et al. 1990. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with Cordia alliodora and Erythrina poeppigiana in Costa Rica. V. Productivity indices, organic matter models and sustainability over ten years. *Agroforestry Systems* (Holanda) 12:229-240.
12. _____. et al. 1991. Balance quinquenal de biomasa, productividad y sostenibilidad en dos sistemas agroforestales de cacao (Theobroma cacao) en Costa Rica. In *Simposio Agroforestal en México*. Nuevo León, Linares, Méx., s.n. p. 97-110.
13. BERNHARD-REVERSAT, F. 1972. Decomposition de la litiere de fuyilles en foret ombrophylle de basse Cote d'Ivoire. *Oecologia Plantarum* (Francia) 7:279-300.
14. _____. 1975. Researches sur l' ecosysteme de la foret subecuatoriele de basse, Cote d'Ivoire. VI. Les cycles des marcrolements. *La Terre et la Vie* (Francia) 29:229-254.
15. BORNEMISZA, E.; ALVARADO, A. 1975. Soil management in Tropical America. Raleigh, N.C., EE.UU., North Carolina University. 565 p.

16. BOYER, J. 1973. Cycles de la matière organique et des éléments minéraux dans une cacaoyère camerounaise. *Cafe, Cacao, The (Francia)* 17:2-23.
17. BRONSTEIN, G.V. 1984. Producción comparada de una pastura de Cynodon plectostachyus asociada con árboles de Cordia alliodora, con árboles de Erythrina poeppigiana y sin árboles. Tesis Mag.Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 110 p.
18. BRUIJNZEEL, L.A.; WIERSUM, K.F. 1985. A nutrient balance sheet for Agathis dammara Warb. plantation forest under various management conditions in Central Java, Indonesia. *Forest Ecology and Management (Holanda)* 10:195-208.
19. BUDOWSKI, G. et al. 1984. Leguminous trees for shade. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira (Bra.)* 19:205-222.
20. CADIMA, A.; ALVIM, P. DE T. 1967. Influencia del árbol de sombra Erythrina glauca sobre algunos factores edafológicos relacionados con la producción de cacao. *Turrialba (C.R.)* 17:330-336.
21. CARVAJAL, J.F. 1984. Cafeto - cultivo y fertilización. 2 ed. Berna, Suiza, Instituto Internacional de la Potasa. 254 p.
22. CASTELLANOS, V.H. 1981. Comportamiento de la yuca sometida a una poda parcial y cultivada en asociación con el frijol arbustivo y voluble. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., UCR/CATIE. 102 p.
23. COMMITTEE ON TROPICAL SOILS (EE.UU.). 1972. Soils of the humid tropics. Washington, D.C., EE.UU., National Academy of Sciences. s.p.
24. CUENCA, G. et al. 1983. Root growth and litter decomposition in a coffee plantation under shade trees. *Plant and Soil (Holanda)* 71:477-486.
25. DACCARET, M.; BLYDENSTEIN, J. 1968. La influencia de árboles leguminosos y no leguminosos sobre el forraje que crece bajo ellos. *Turrialba (C.R.)* 18:405-408.
26. DIAZ-ROMEY, R. et al. 1970. Contenido de la materia orgánica y nitrógeno de los suelos de América Central. *Turrialba (C.R.)* 20:185-192.

27. DOBEREINER, J. 1984. Nodulacao e fixacao de nitrogenio em leguminosas forestais. Pesquisa Agropecuaria Brasileira (Bra.) 19:83-90.
28. EDWARDS, P.J. 1977. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. II. The production and disappearance of litter. Journal of Ecology (G.B.) 65:971-992.
29. _____.; GRUBB, P.J. 1977. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. Journal of Ecology (G.B.) 65:943-969.
30. EGUNJOBI, J.K.; BADA, S.O. 1979. Biomass and nutrient distribution in stands of Pinus caribaea in the dry zone of Nigeria. Biotropica (EE.UU.) 11:130-135.
31. ENRIQUEZ, G. 1983. El cultivo del cacao. Turrialba, C.R., CATIE. 162 p.
32. FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS). 1983. El reciclaje de materias orgánicas en la agricultura de América Latina. FAO Soil Bulletin no. 51. 253 p.
33. FASSBENDER, H.W.; GRIMM, U. 1981. Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. II. Producción y descomposición de residuos vegetales. Turrialba (C.R.) 31:39-47.
34. _____.; GRIMM, U. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. IV. Modelos y conclusiones. Turrialba (C.R.) 31:101-108.
35. _____ . et al. 1985. Ciclos de la materia orgánica y elementos nutritivos en cultivos tropicales permanentes, experiencias con cacao. In Seminar on Nutrient Research and Low Input Agriculture for the Tropics. Anais. Ed. por P. Cabala. Itabuna, Bra., CEPLAC. p. 231-257.
36. _____ . et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora), café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. III. Modelos de la materia orgánica y elementos nutritivos. Turrialba (C.R.) 35:403-413.

37. _____; BORNEMISZA, E. 1987. Química de suelos. San José, C.R., IICA. 420 p.
38. _____; ALPIZAR, L. 1987. Criteria for the evaluation of organic matter and nutrient cycling in agroforestry systems. In Advances in Agroforestry Research (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. Ed. by J.W. Beer; H.W. Fassbender; J. Heuveldop. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. p. 91-103.
39. _____ 1987. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. CATIE. Serie de Materiales de Enseñanza no. 29. 475 p.
40. _____, et al. 1988. Modelling 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) 6:49-62.
41. _____, et al. 1991. Ten years balances of organic matter and nutrients in agroforestry systems at CATIE, Costa Rica. Forest Ecology and Management (Holanda) 45:173-183.
42. _____ 1990. Umweltverträgliche Landnutzung in den feuchten Tropen. In DSE/ATSAF Landnutzung in den feuchten Tropen. Actas del Seminario. Feldafing, Alemania, R.F., s.n. p. 60-79.
43. FÖLSTER, H.; KHANNA, P. 1976. A tropical evergreen forest site with perched water table, Magdalena Valley, Colombia. Oecologia Plantarum (Francia) 11:298-320.
44. _____; SALAS, G. DE LAS. 1976. Litter fall and mineralization in three tropical evergreen forest stands, Colombia. Acta Científica de Venezuela (Ven.) 37:192-202.
45. FRISSELL, M.J. (ed.). 1978. Cycling of mineral nutrients in agriculture ecosystems. Amsterdam, Holanda, Elsevier Scientific Publishing. 358 p.
46. GLIESMANN, S.R. Aspects of nitrogen distribution in several traditional agroecosystems in the humid tropical low-lands of South-Eastern México. Plant and Soil (Holanda). s.n.t.

47. GLOVER, N.; BEER, J.W. 1983. Spatial and temporal fluctuation of litter fall in the agroforestry associations Coffea arabica - Erythrina poeppigiana and C. arabica - E. poeppigiana - Cordia alliodora. Turrialba, C.R., CATIE. 43 p.
48. GOLDBERG, A.D.; JIMENEZ AVILA, E. 1982. Estudios ecológicos en el agroecosistema cafetalero. IV. Distribución de la biomasa aérea en diferentes estratos del cafetal. Xalapa, Veracruz, Méx., INIREB 8030120. s.p.
49. GOLLEY, F.B. 1975. Mineral cycling in a tropical moist forest ecosystem. Athenas, EE.UU., University of Georgia Press. 248 p.
50. _____. 1983. Ecosystems of the world 14a: tropical rain forest ecosystems. Amsterdam, Holanda, Elsevier Scientific Publishing Company. s.p.
51. GREENLAND, D.J.; KOWAL, J.M.L. 1960. Nutrient content in a moist tropical forest of Ghana. Plant and Soil (Holanda) 12:154-174.
52. GRIMM, U.; FASSBENDER, H.W. 1981. Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. I. Inventario de las reservas orgánicas y minerales (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Al, Na). Turrialba (C.R.) 31:27-37.
53. _____. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. III. Ciclo hidrológico y translocación de elementos químicos con el agua. Turrialba (C.R.) 31:89-99.
54. HASE, H.; FÖLSTER, H. 1982. Bioelement inventory of a tropical (semi) evergreen seasonal forest on eutrophic soils, Western Llanos, Venezuela. Oecologia Plantarum (Francia) 17:331-346.
55. HENDRY, C.D.; BERISH, C.W.; EDGERTON, E.S. 1984. Precipitation chemistry at Turrialba, Costa Rica (Central America). s.l., EE.UU., Water Resources Research. s.p.
56. HERRERA, R. et al. 1978. Amazon ecosystems. Their structure and functioning with emphasis on nutrients. Interscience (EE.UU.) 3:223-232.

57. _____; JORDAN, C.F. 1981. Nitrogen cycle in a tropical rain forest: the Caatinga of low mineral nutrient status. *Ecol. Bull. (Suecia)* 33:493-505.
58. _____; KLINGE, H. 1982. Phytomass of tall Amazon Caatinga forest near San Carlos de Rio Negro, Southern Venezuela. *Vegetatio (Holanda)*. s.p.
59. _____, et al. 1987. Coffee and cacao plantations under shade trees in Venezuela, recent advances in agroforestry research. *In* *Advances in Agroforestry Research (1985, Turrialba, C.R.)*. Proceedings of a seminar. Ed. by J.W. Beer; H.W. Fassbender; J. Heuveldop. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. p. 173-181.
60. HEUVELDOP, J. et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*) y de café con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. II. Producción agrícola, maderable y de residuos vegetales. *Turrialba (C.R.)* 35:347-355.
61. _____, et al. 1988. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with *Cordia alliodora* and *Erythrina poeppigiana* in Costa Rica. II. Cacao and wood production; litter production and decomposition. *Agroforestry Systems (Holanda)* 6:37-48.
62. IMBACH, A. C. et al. 1989. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poró (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. IV. Water balances, nutrient inputs and lixiviation. *Agroforestry Systems (Holanda)* 8:267-287.
63. _____; FASSBENDER, H.W.; BEER, J.W. 1992. Producción de residuos vegetales de cacao (*Theobroma cacao*) con laurel (*Cordia alliodora*) y con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Costa Rica. *Theobroma (Bra.)*. (sin publicar).
64. JENNY, H. 1959. Causes of the high nitrogen and organic matter content of certain tropical forest soils. *Soil Science (EE.UU.)* 69:63-69.
65. _____; GESSEL, S.P.; BINGHAM, F. 1949. Comparative study of decomposition of organic matter in temperate and tropical regions. *Soil Science (EE.UU.)* 68:419-432.

66. JIMENEZ, E.; MARTINEZ, P. 1979. Estudios ecológicos del agroecosistema cafetalero. II. Producción de materia orgánica en diferentes tipos de estructura. *Biótica* (Mex.) 4(3):109-126.
67. JIMENEZ, F. 1976. Estudio de la absorción de nutrimentos en un agroecosistema de producción de frijol, maíz y yuca. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., UCR/CATIE. 90 p.
68. JORDAN, C.F.; ESCALANTE, G. 1980. Root productivity in Amazonian rain forest. *Ecology* (EE.UU.) 61:14-18.
69. _____; HERRERA, R. 1981. Tropical rain forest: are nutrients really critical? *The American Naturalist* (EE.UU.) 117:167-180.
70. _____. et al. 1982. The nitrogen cycle in a "tierra firme" rain forest on oxysol in the Amazon territory of Venezuela. *Plant and Soil* (Holanda) 67:325-332.
71. _____. 1982. The nutrient balance of an Amazonian rain forest. *Ecology* (EE.UU.) 63:647-654.
72. _____; RUSSELL, CH.E. 1983. Jari, productividad de las plantaciones y pérdidas de nutrientes debido al corte y quema. *Interciencia* (Ven.) 8:294-296.
73. _____. et al. 1983. Nitrogen dynamics during conversion of primary Amazonian rain forest to slash and burn agriculture. *Oikos* (Dinamarca) 40:131-139.
74. _____. 1985. *Nutrient cycling in tropical forest ecosystems*. New York, EE.UU., J. Willey. 190 p.
75. KASS, D.L. et al. 1989. Resultados de seis años de investigación de cultivo en callejones (alley cropping) en "La Montaña", Turrialba, Costa Rica. *El Chasqui* (C.R.) no. 19:5-24.
76. KLINGE, H. 1973. Biomass and organic matter in the soil of a tropical rain forest of Central Amazonia. *Acta Científica Venezolana* (Ven.) 24:174-181.
77. _____. 1977. Fine litter production and nutrient return to the soil in three natural stands of Eastern Amazonia. *Geo-Eco-Trop.* 1:159-167.

78. _____. 1976. Bilanzierung von Hauptnährstoffen im Ökosystem tropischer Regenwald (Manaos). *Biogeotropica* 7:59-77.
79. _____.; RODRIGUEZ, W.A. 1968. Litter production in an area of the Amazon terra firme. *Amazoniana (Bra.)* 1:287-310.
80. _____.; HERRERA, R. 1979. Biomass studies in Amazon caatinga forest in Southern Venezuela. 1. Standing crop of composite root mass in selected stands. *Tropical Ecology (India)* 19:90-110.
81. _____. 1983. Phytomass structure of natural plant communities on spodosols of Southern Venezuela: the tall caatinga forest. *Vegetatio (Holanda)* 53:65-84.
82. _____. 1985. Lowland Amazonas forest, bioelements and geochemistry. *In* *Symposio del Trópico Húmedo* (1., Belem, Bra.). s.n.t. (Sin publicar).
83. LAL, R. 1989. Agroforestry systems and surface management of a tropical alfisol. I. Soil moisture and crop yields. *Agroforestry Systems (Holanda)* 8:7-29.
84. _____. 1989. Agroforestry systems and surface management of a tropical alfisol. III. Changes in soil chemical properties. *Agroforestry Systems (Holanda)* 8:113-132.
85. _____. 1989. Potential of agroforestry as a sustainable alternative to shifting cultivation: concluding remarks. *Agroforestry Systems (Holanda)* 8:239-249.
86. LUNDGREN, B. 1978. Soil conditions and nutrient cycling under natural and plantation forest in Tanzanian highlands. Swedish University of Agricultural Sciences. Dept. of Forest Soils. Reports in Forest Ecology and Forest Soils no. 31. s.p.
87. MARTINEZ, M.; BLASCO, M. 1972. Metabolismo en términos de CO₂ en los suelos cacaoteros de Turrialba, Costa Rica. *Turrialba (C.R.)* 22:415-419.
88. NAIR, P.K.R. 1984. Soil productivity aspects of agroforestry. ICRAF. Science and Practice of Agroforestry no. 1. 85 p.

89. _____. 1988. Agroforestry systems in the tropics. Dordrecht, Holanda, Kluwer. 664 p.
90. NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES (EE.UU.). 1979. Tropical legumes: resources for the future. Washington, D.C., EE.UU. s.p.
91. NWOBASHI, L.C. 1980. Nitrogen cycling in a teak plantation in Nigeria. *In* Nitrogen cycling in West African ecosystems. Ed. by T. Roswall. s.l., SCOPE/UNEP/MAB/IITA. 450 p.
92. NYE, P.H.; GREENLAND, D.J. 1964. Changes in the soil after clearing tropical forest. *Plant and Soil* (Holanda) 21:101-110.
93. ODUM, P.H.; PIGEON, R.F. (eds.). 1970. A tropical rain forest. Springfield, Va., EE.UU., Atomic Energy Commission. s.p.
94. OGAWA, H. 1978. Litterfall and mineral nutrient of litter in Pasoh forest. *Malayan Nature Journal* (Malasia) 30:375-380.
95. OHLER, F.M.J. 1980. Phytomass and mineral content in undisturbed forest. *CELOS Rapporten* (Surinam) no. 132. s.p.
96. ROBERTSON, G.P.; HERRERA, R.; ROSWALL, T. 1982. Nitrogen cycling in ecosystems of Latin America. *Plant and Soil* (Holanda) 67, Special Volume.
97. RODRIGUEZ, R.A. 1985. Producción de biomasa de poró gigante (*Erythrina poeppigiana*) y king grass (*Pennisetum purpureum* x *P. typhoides*) intercalados en función de la densidad de siembra y frecuencia de poda de poró. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 96 p.
98. ROSWALL, T. (ed.). 1980. Nitrogen cycling in Westafrican ecosystems. s.l., SCOPE/UNEP/MAP/IITA. 450 p.
99. ROSKOWSKI, J. 1981. Nodulation and N₂ fixation by *Inga jinicuil* and field CH₂ reduction rates. *Plant and Soil* (Holanda) 59:201-206.
100. RUBBER RESEARCH INSTITUTE OF MALAYSIA. 1972. Cycle of nutrients in rubber plantations. *Planter's Bulletin* (Malaysia) 120:73-81.

101. RUNDELL, P.W. et al. 1982. Seasonal dynamics of nitrogen cycling for a Prosopis woodland forest in the Sonoran desert. *Plant and Soil (Holanda)* 67:343-353.
102. SANCHEZ, J.F. 1989. Análisis de la estabilidad y dinámica de producción de cultivos en callejones. Tesis Mag.Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 174 p.
103. SANCHEZ, P.A. 1981. Suelos del trópico, características y manejo. IICA. Serie de Libros y Materiales Educativos no. 48. 660 p.
104. _____. 1987. Soil productivity and sustainability of agroforestry systems. In Steppler, H.A.; Nair, P.K.R. *Agroforestry, a decade of development*. Nairobi, Kenia, ICRAF. 335 p.
105. SANTANA, M.B.M.; CABALA, P. 1982. Dynamics of nitrogen in a shaded cacao plantation. *Plant and Soil (Holanda)* 67:271-281.
106. _____.; CABALA, R.P. 1983. Requerimientos de nitrogenio em um agrosistema de cacau. *Theobroma (Bra.)* 13:211-221.
107. _____.; CABALA, R.P. 1984. Reciclagem de nutrientes en una plantacao de cacau sombreada com Erythrina. In International Cocoa Research Conference (9., 1984, Togo). Proceedings. Lagos, Nigeria, Cocoa Producers Alliance. p. 205-210.
108. SPAIN, J.M.; SALINAS, J.G. 1985. El reciclaje de nutrientes en pastos tropicales. In Seminario sobre Ciclaje de Elementos Nutritivos y "Low Input" Agricultura para los Trópicos. Ed. P. Cabala. Itabuna, Bra., CEPLAC. p. 259-299
109. STEPLER, N.; NAIR, P.K.R. 1978. *Agroforestry, a decade of development*. Nairobi, Kenia, ICRAF. 335 p.
110. STEVENSON, A. (ed.). 1982. *Nitrogen in agricultural soils*. Wis., EE.UU., ASA-Publication. 940 p.
111. SZOTT, L.T. et al. 1988. Agroforestry systems for acid soils in the humid tropics. s.n.t. Presented of American Soc. of Agronomy Annual Meeting (American, Ca.). (Sin publicar).

112. TANNER, E.V.J. 1977. Four montain rain forest of Jamaica: a quantitative characterization. *Journal of Ecology* (G.B.) 65:883-896.
113. _____. 1980. Litterfall in montane rain forest of Jamaica and its relation to climate. *Journal of Ecology* (G.B.) 68:833-848.
114. _____. 1981. The decomposition of the leaf litter in Jamaican forest. *Journal of Ecology* (G.B.) 69:263-275.
115. THONG, K.C.; NG, W.L. 1978. Growth and nutrient composition of crop cocoa plants on inland Malaysian soils. In International Conference on Cocoa and Coconuts (Kuala Lumpur, Malaysia). s.n.t. 25 p.
116. UHL, C.; JORDAN, C. 1984. Vegetation and nutrients dynamics during the first five years of succession following forest cutting and burning in the Río Negro region of Amazonia. *Ecology* (EE.UU.) 65:1476-1490.
117. YOUNG, A. 1987. Soil productivity, soil conservation and land evaluation. *Agroforestry Systems* (Holanda) 5:277-292.
118. _____. 1989. Ten hypotheses for soil-agroforestry research. *Agroforestry Today* (Kenia) 1:13-16.
119. _____. 1989. Agroforestry for soil conservation. CAB-International /ICRAF. *Science and Practice of Agroforestry* no. 4. 276 p.

CAPITULO SEXTO

EL CICLO DEL FOSFORO

6.1. El fósforo en el suelo

6.1.1. Contenido del fósforo en el suelo

El fósforo es relativamente estable en los suelos. No presenta compuestos inorgánicos como por ejemplo los nitrogenados que pueden ser volatilizados y lixiviados. De esta alta estabilidad resulta una baja solubilidad que a veces causa deficiencias de disponibilidad de P para las plantas, a pesar de la continua mineralización de compuestos orgánicos del suelo. Esto puede evitarse en parte por medio de una fertilización fosfatada, los fosfatos aplicados al suelo son sin embargo, objeto de reacciones rápidas de "fijación". Así la dinámica del fósforo en el suelo incluye una serie de reacciones y transformaciones. Dada su importancia, el fósforo ha sido objeto de estudios y publicaciones específicas (10, 23, 57).

Los contenidos de P en suelos de áreas tropicales son muy variables. Una revisión amplia de la información disponible al respecto, ha sido publicada recientemente por Fassbender y Bornemisza (23). De esa obra se presentan datos promedio de diferentes autores sobre P-total y sus formas en algunos suelos de América Latina (Cuadro 6.1). Para el P total se han informado valores extremos de $18 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de suelo en oxisoles y ultisoles de Venezuela y de $3300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de suelo para los derivados de cenizas volcánicas de América Central (14, 15, 23). Las grandes variaciones en el contenido de P-total se deben a la variabilidad de las rocas parentales, al desarrollo de los suelos y a otras condiciones edafológicas y ecológicas.

6.1.2. Formas de P en el suelo

El fósforo se encuentra originalmente en las rocas, o sea el material originario del suelo. La meteorización de las rocas produce la liberación del mismo, el cual pasa a la solución del suelo y da origen al ácido fosfórico (H_3PO_4 ; H_2PO_4^- ; HPO_4^{2-} y PO_4^{3-}). Estas formas dependen del pH del suelo; un pH entre 2 - 8 mantiene en el suelo la forma fosfatada H_2PO_4^- la cual es absorbida por las plantas, para producir sustancias orgánicas fosfatadas generales de alto contenido energético (proteínas, ATP, enzimas, coenzimas, hormonas, etc.). Otras sustancias fosfatadas son el inositol y sus derivados como la

Cuadro 6.1. Contenido y formas de P en algunos suelos de América Latina (según Fassbender y Bornemisza, 23).

Autor	Pais, región	No. de muestras	mg P/Kg suelo					Ocluido orgánico	% P orgánico
			Total	Al-P	Fe-P	Ca-P			
García	México	7	-	11	18	175	-	-	
Dahnke, Malcolm y Menéndez	El Salvador	17	601	25	47	75	61	12	
Chaverri	Costa Rica	16	1444	218	176	51	147	-	
Fassbender, et al	América Central (Ca-P pred.) (Al, Fe-P pred.)	80 30	889 1241	58 104	40 120	161 50	251 214	41 52	
Fassbender	América Central (cen. volc.)	34	1142	92	55	124	274	43	
Tafur y Blasco	Colombia, Valledupur	11	415	27	49	67	151	27	
Bastidas y col.	Colombia, Putumayo	45	1270	226	189	40	431	30	
Blasco	Colombia, Nariño, Altiplano Medio		1442 543	155	177	138	858	8	
Blasco y Bohorquez	Colombia, Cauca	11	591	32	54	36	344	20	
Westin y Brito	Venezuela	23	204	21	28	18	-	39	
Fassbender y Díaz	Brasil, Maranhao	8	600	17	21	15	107	73	
Cabala y Fassbender	Brasil, Bahía	8	713	11	42	31	200	61	
Vieira y Bornemisza	Brasil, Amazonas, Latosol No Latosol	7 5	369 556	52 28	37 88	10 12	- -	40 39	
Coulot y Bolaños	Argentina, Buenos Aires	3	646	19	19	49	3	47	
Ahmad y Jones	Barbados	6	1725	185	128	413	322	-	

fitina. El inositol es un alcohol derivado del fenol, molécula con tres unidades de ácido fosfórico, con carácter fenólico y ácido al mismo tiempo. Produce las fitinas, las cuales representan el 50% de las sustancias orgánicas presentes en las plantas, tanto en la parte aérea como en las raíces (23).

A partir de la hojarasca se producen residuos vegetales que pasan al suelo, los cuales contienen altos contenidos de fósforo orgánico, con las mismas características del fósforo de la planta. El fósforo orgánico varía entre el 40 y el 80% del fósforo total. En términos generales la mitad del fósforo en el suelo es de carácter orgánico. Existe una relación entre el contenido de carbono con el contenido de fósforo en el suelo; variando de acuerdo con: C/P = 100 (suelo rico en fósforo); C/P = 200 (promedio); C/P = 500 (suelo pobre en fósforo).

El ácido fosfórico en el suelo puede reaccionar y ligarse a iones de calcio, aluminio o hierro, formando fosfatos cristalizados, con características definidas (23):

- Fosfatos de calcio: monofosfatos de calcio, difosfatos de calcio, octafosfatos de calcio, apatita hidroxílica y apatita carbonatizada
- Fosfatos aluminicos
- Fosfatos férricos
- Fosfatos ocluidos están asociados a concreciones de hierro

La distribución de estas formas está relacionada con los procesos de evolución y formación del suelo y del pH del mismo.

En las rocas primarias solamente se encuentran fosfatos de calcio. Durante los procesos de formación del suelo, las rocas primarias se van meteorizando y produciendo ácido fosfórico el cual es absorbido por las plantas, o pasa a ser parte de los fosfatos de hierro y aluminio; de manera que a través del tiempo se va produciendo un aumento de fosfatos de hierro y aluminio (hasta que se agota el fósforo disponible), va disminuyendo las cantidades de fosfatos y calcio y va aumentando la cantidad de fosfatos ocluidos (23).

Resumiendo se puede observar que a medida que un suelo envejece, y baja su pH; el fosfato de calcio disminuye y aumentan los fosfatos de hierro y aluminio y más tardíamente predominan los fosfatos ocluidos, resultando así la siguiente distribución:

Suelos jóvenes: predominan Ca-P

Suelos intermedios: Ca-P disminuyen, predominan Fe-P y Al-P

Suelos viejos: predominan P-ocluidos

En el encalado se produce elevación del pH y se acelera la mineralización del P orgánico, pero excesos de cal resultan contraproducentes porque tienden a inmovilizar otras bases (K, Mg). En función de esto, es necesario caracterizar la dinámica del suelo reconociendo la distribución de las diferentes formas de fósforo en el suelo con metodologías apropiadas (23).

6.2. Ciclo del fósforo en ecosistemas naturales

6.2.1. Acumulación y transferencias

Las reservas de P varían entre los ecosistemas notablemente, especialmente por las variaciones en los suelos. La interpretación de los valores de P-total en el suelo implica ciertas dificultades, la información sobre las formas de P asociadas a la formación de fosfatos de calcio, aluminio, hierro o inertes no siempre está disponible; en suelos tropicales ácidos predominan generalmente las formas menos solubles de fosfatos férricos o inertes (23, 25).

La información disponible sobre la acumulación y las transferencias de P en ecosistemas naturales ha sido resumida en el Cuadro 6.2; hasta ahora han sido analizados unos pocos ecosistemas (25). Los valores publicados se refieren al P-total acumulado en la vegetación, el mantillo o suelo mineral para evaluar las reservas en los ecosistemas. De manera general las reservas de P oscilan entre 100 y 400 kg.ha⁻¹, en casos excepcionales se han encontrado valores más altos como en los ecosistemas de San Eusebio (Venezuela, 32), Llanos Occidentales (Venezuela, 34) o Bancos (Costa de Marfil 7, Cuadro 6.2). Como las acumulaciones en la vegetación no pasan generalmente de 100 kg P.ha⁻¹, la mayor parte se encuentra en el suelo. El contenido de P en los diferentes compartimentos de la vegetación normalmente sigue el orden hojas > ramas > tallos > raíces (Cuadro 4.3). En función del contenido de la materia orgánica en los compartimentos resultan valores muy diversos de P en los diferentes órganos de la vegetación (Cuadro 4.2).

Cuadro 6.2. Reservas (kg.ha⁻¹) y transferencias (kg.ha⁻¹.a⁻¹) P en ecosistemas forestales tropicales (según diferentes autores).

	FITOMASA			Manti- llo	Suelo mineral (cm)	Total	Veget. suelo	Lluvia	Veget. lluvia (años)	Escu- rrim. (parco.)	Resi- duos veg.	"Turn over"
	Aérea	Raíces	Turn									
ECOSISTEMAS MONTANOS PLUVIOSOS												
San Eusebio Venezuela	56	14	29	3382 (40)	3481	0,03	1,1	90	1,4	0,26	4,0	4,3
Grimm Fassbender Fassbender Grimm 19, 20, 32, 33												
Kerigoma Papua	69	7	9	108 (25)	193	0,79	-	-	-	-	-	-
Edwards, Grubb 11, 12												
Blue Forest Jamaica	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tanner, 63, 64, 65												
El Verde Pto. Rico	59	6	12	220 (30)	297	0,35	-	-	-	-	1,1	-
Odum, 53												
E. DE LLANURA PLUVIOSOS												
Manaos, Brasil	62	7	1	124 (30)	194	0,56	0,3	233	-	-	2,1	1,8
Klinge Klinge, Rodríguez 46, 47												
Magdalena	27	-	18	254 (50)	299	0,18	-	-	-	-	4,2	-
Fölster y Khanna Fölster, Salas 28, 29												
Llanura Colombia Depresión	102	16	205 (50)	249	0,26	-	-	-	-	3,4	-	-
Kabo, Suriman	102	37	9	13 (50)	161	11,4	-	-	-	-	-	-
Ohler 54												
Darién	144	6	14	22 (30)	186	7,00	1,0	390	0,6	0,70	8,6	7,5
Golley et al. Llanura Panamá												
San Carlos Venezuela	40	18	2	292 (40)	352	0,21	26,9	2,2	11,9	30,0	1,2	16,2
Jordan, Herrera 40, 41, 43												
Llanos Occid. Venezuela	291	-	10	2474 (50)	2775	0,12	-	-	-	-	-	-
Hase, Fölster 34												
Banco Costa Marfil	100	-	-	750 (50)	850	0,13	0,5	200	9,8	-	13,6	25
Yapo	70	-	-	100 (50)	170	0,70	-	140	-	-	5,5	11
Greenland y Kowal 31												
Kade Ghana	125	11	1	4 (30)	140	34,25	0,4	350	4,1	-	-	-
Nye Greenland 31, 52												

Al comparar las reservas del suelo con las de la vegetación se constata que el P es muy estable y su circulación en la naturaleza es limitada. La acumulación en la vegetación es muy paulatina.

En el caso de los ecosistemas de Darién (Golley *et al*, 30), Kobo en Surinam (Ohlert, 54) y de Kade, Ghana (Greenland y Kowal, 31) la situación es inversa; las reservas del suelo son mucho menores que las de la vegetación, resultando así ecosistemas muy vulnerables.

La deposición de P con el agua de lluvia es muy pequeña (menor de $1 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) en función de la estabilidad de este elemento; el valor encontrado en San Carlos de Río Negro ($27 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) lo explican Jordan y Herrera (43) con base en la posible volatilización de P a partir del suelo.

Las tasas de transferencia del P con los residuos vegetales oscilan entre 1 y $14 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ (Cuadro 4.10). Así mismo la tasa de absorción por la vegetación es baja ($9 - 14 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, Cuadro 5.2). Comparando estos valores con los de otros elementos se constata que este elemento tiene una movilidad muy pequeña en la naturaleza.

6.2.2. Modelos de los ciclos del fósforo

Con base en los datos de reservas y transferencias de los ecosistemas se puede diseñar el modelo del ciclo del P correspondiente. A manera de ejemplo se presenta en las Figuras 6.1 y 6.2 el modelo del ciclo de P para el ecosistema montano de San Eusebio, Venezuela y de llanura de Darién, Panamá, en función de los datos de Grimm, Fassbender (19, 20, 32, 33) y Golley *et al* (30).

Ecosistema de llanura

Las determinaciones de biomasa y reservas de elementos químicos para el ecosistema de Darién se basan en datos de dos parcelas analizadas, una en la época seca y la otra durante el período de lluvias. Las especies dominantes fueron espavel (Anacardium excelsum), cuipo (Canavillesia platanifolia) y bongo (Ceiba pentandra). Excepcional en este estudio es la determinación de la biomasa de los herbívoros, carnívoros y detritófagos y su participación en los procesos de transferencia (30).

Las reservas en la vegetación alcanzaron $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, la fauna $0,05 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; las reservas en el suelo son muy pequeñas ($22 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$), implicando un grado de especialización de los componentes bióticos del ecosistema.

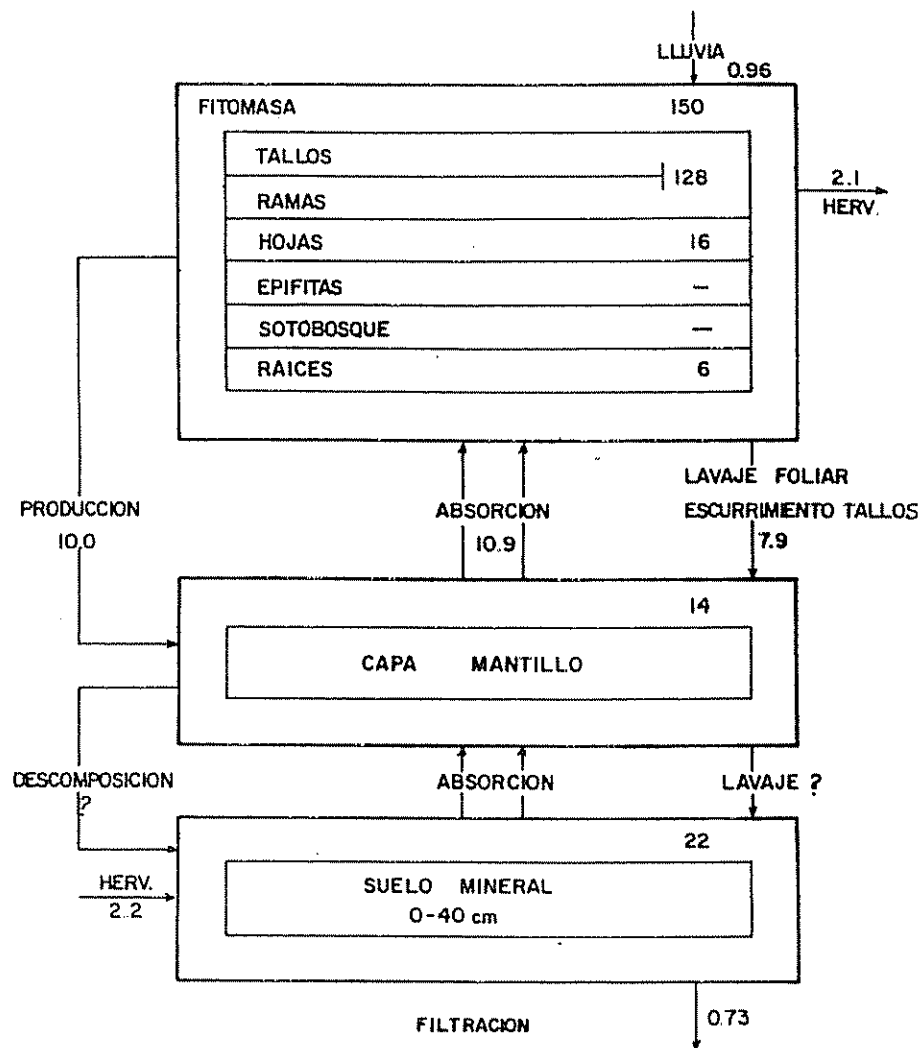


Figura 6.1. Ciclo del fósforo en el ecosistema de llanura de Darién, Panamá (según Golley *et al.*, 30; reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$).

La deposición con las lluvias es de $0,96 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, cantidad mayor que la de filtración ($0,73 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$), la cual fue medida en la descarga del río.

· Ecosistema montano

En el ecosistema andino de San Eusebio (19, 20, 32, 33) las reservas del P son bastante altas y se encuentran acumuladas en casi su totalidad (99%) en el suelo. La vegetación acumulada, sin embargo, suficiente P para lograr una dinámica adecuada con un "turnover" del

6.3.2. Fertilización y fijación de P en los suelos

El fósforo es muchas veces un factor limitante en la producción, por esto es necesario fertilizar el suelo.

Los restos orgánicos (vegetales, animales y humanos, guano) representan una fuente de apatita, fitina y por ende fosfatos que activan todo el proceso del ciclo del fósforo. En el Capítulo 4.3.3 se han tratado los detalles del manejo agronómico de la materia orgánica en agroecosistemas con:

- el manejo de los barbechos
- las rotaciones de cultivos
- uso de residuos vegetales y animales
- abonos verdes y materiales de cobertura

Todos los aspectos presentados se pueden extrapolar al fósforo ya que este elemento es un componente de esos materiales y a través de su mineralización se producen formas de P directamente aprovechables.

El efecto de los fertilizantes fosfatados depende en gran parte de su naturaleza química (contenido de P_2O_5 , solubilidad y velocidad de disolución) (23).

Las rocas fosfatadas (apatitas, fosfatos naturales) se pueden utilizar directamente como fertilizantes en condiciones específicas, especialmente suelos ácidos.

Su distribución es muy definida, principalmente en: Brasil, Venezuela, Perú, península de Florida (EE.UU), península de Cola (Rusia) y Africa del norte (el antiguo Sahara Español, Marruecos, primer exportador de roca fosfatada, Argelia y Libia). Estos yacimientos de apatita se producen como resultado de la deposición de restos de organismos animales en forma masiva, los cuales normalmente son recubiertos con sedimentos de alguna naturaleza (23).

Dentro de los fertilizantes fosfatados industriales se diferencian (23, 25):

- fertilizantes solubles en agua: ácido fosfórico, superfosfato simple, superfosfato triple, fosfatos amónicos

- fosfatos térmicos: escorias Thomas, fosfato de Rhenania
- fosfatos condensados y
- mezclas de fertilizantes

Su eficiencia depende de una gran cantidad de interacciones en el sistema fertilizante-suelo-planta, descrito ampliamente por Fassbender y Bornemisza (23).

El mayor problema en la utilización y eficiencia de los fertilizantes lo constituye la tendencia del fósforo a *fijarse*. Con ello se describen una serie de reacciones formándose en el suelo fosfatos de calcio, aluminio o hierro de menor solubilidad, poco disponibles para las plantas (14, 15, 16, 17). Normalmente y dependiendo de las características del suelo, el fósforo se fija hasta en un 95%. Solamente un 5% del fósforo aplicado como fertilizante aparece en las plantas. Los fertilizantes fosfatados son muy costosos y se pierden así fácilmente y rápidamente.

El fósforo, la roca fosfórica u otras fuentes están distribuidas a nivel mundial, tan específicamente, que la aplicación de fertilizantes fosfatados generalmente representa una importación y la necesaria pérdida de divisas para cualquier país que no cuenta con fuentes naturales. Las reservas de P a nivel mundial son además escasas y con la tasa actual de utilización, que alcanza los 60 millones de toneladas/año, se estima que en 100 años el fósforo se habrá agotado como fuente directa, si no se encuentran otros yacimientos o desarrollan nuevas tecnologías de reutilización.

Se ha encontrado que en una capa marina que va desde la superficie hasta 300-600 m la concentración de fosfatos solubles es relativamente alta. Se está investigando la forma de recuperar y utilizar esta fuente potencial de fosfatos. Otra alternativa es la recirculación de desechos orgánicos humanos (excretal), ricos en fósforo. El tratamiento de las aguas negras (detergentes, excreta, etc...) ricas en fósforo, con hidróxidos de calcio puede producir fertilizantes fosfatados.

Fassbender y Bornemisza (23) han discutidos ampliamente otras posibilidades agronómicas para mejorar la eficiencia de fertilizantes fosfatados, ellas incluyen:

- Optimización del sistema y época de fertilización (bandas, voleo, postura cerca de raíces; regulación de disponibilidad con época de absorción).

- Regulación a través del tamaño de partículas (velocidad de disolución, fertilizantes granulados, "peletizados", mezclas de fertilizantes).
- Aplicaciones de silicatos (enmascarado de la fijación).
- Aplicaciones de encalado y regulación del pH para determinar las formas de P en el suelo y la velocidad de disolución.
- Regulación de las interacciones con otros elementos nutritivos.
- Mejoramiento de las interacciones con los microorganismos (micorrizas) en la rizosfera.

6.3.3. El fósforo en plantaciones forestales

En las plantaciones forestales, el ciclo del P paulatinamente toma un carácter cerrado y de transferencias internas ya que la ganancia ("input") de P a través de las lluvias, fertilización o meteorización de minerales fosfatados de la roca madre es pequeña. Los árboles absorben el H_2PO_4^- del suelo y los fosfatos orgánicos y los van acumulando en la fitomasa; con la producción de residuos vegetales se acumula P en la capa de mantillo, a través de la mineralización se liberan nuevamente iones de ácido fosfórico que pueden ser absorbidos por las plantas. La pérdida de P con el agua de filtración se puede también considerar pequeña. Con la cosecha de madera se exportan las cantidades de P acumuladas en el sistema. En caso de monocultivos forestales se debe, por lo menos, reponer o compensar las cantidades extraídas por medio de una fertilización.

Según datos de Egunjobi y Bada (Cuadro 4.18; 13) una plantación de pino caribe de 10 años de edad en Nigeria acumuló $26,7 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$, distribuidos así: 23% en las hojas, 29% en los tallos y 25% en las raíces. La capa de mantillo representó $2 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$.

En el Cuadro 4.19 se pueden observar los valores de la acumulación de P en una plantación de Agathis dammara de 40 años en Java, Indonesia (9). Del total de $348 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$ se encontraron respectivamente 68 en las hojas, 133 en las ramas, 147 en el tallo y la corteza. El valor promedio de extracción de P corresponde a $10 \text{ kg P}\cdot\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$.

Un balance completo del P para un ciclo de utilización forestal de 30 años para Pinus patula y Cupressus lusitanica en las montañas de

Tanzania se ha resumido en el Cuadro 6.3 de acuerdo con los valores de Lundgreen (50; ver también Cuadro 5.9 para nitrógeno).

La extracción total de P en una rotación de Pinus patula de 30 años de edad, equivale a 126 kg P.ha⁻¹, la correspondiente a Cupressus lusitanica es de 93 kg P.ha⁻¹. Ello equivale a una extracción promedio anual de 4 y 3 kg P.ha⁻¹.a⁻¹) respectivamente.

Los pocos datos encontrados sobre el ciclo de P en plantaciones forestales tropicales indican claramente que en este campo existe una necesidad de investigación muy importante.

Cuadro 6.3. Balance de P en rodales de Pinus patula y Cupressus lusitanica en Tanzania en una rotación de 30 años (kg.ha⁻¹; según Lundgren 50).

	<u>Pinus patula</u>	<u>Cupressus lusitanica</u>
Valores anuales		
Extracción	13	10
Retorno al suelo	5	4
Remoción por raleos	2	1
Acumulación en biomasa	6	5
Valores totales en rotación		
Inventario total	186	147
Exportación final con la cosecha	81	63
Residuos de cosecha en el suelo	105	84
Remoción total	126	93
Extracción promedio anual	4	3

6.4. El fósforo en sistemas de producción agroforestales

6.4.1. Aspectos generales

Como fue indicado anteriormente, las bases generales del modelaje de sistemas (Capítulos 1.3.3; 2.2.4. y 2.6.) son aplicables

para describir el ciclo de P en sistemas de producción agroforestales. La base es el ciclo de la materia orgánica y la determinación de P en todos los materiales de acumulación y transferencia.

La información disponible sobre los ciclos de P en sistemas agroforestales es aún muy escasa. Existen ejemplos basados en resultados obtenidos en sistemas de café y cacao con árboles de sombra (1, 2, 3, 4, 5, 6, 21, 22, 24, 26, 27, 36, 37, 38, 39, 45, 51, 56, 58, 59, 60), que serán descritos en los acápites subsiguientes.

6.4.2. Sistemas de café con árboles de sombra.

El ciclo del P se puede ilustrar con los estudios realizados en el Experimento Central del CATIE en Turrialba, Costa Rica en los sistemas de café (*Coffea arabica*) bajo sombra de laurel (*Cordia alliodora*) y de poró (*Erythrina poeppigiana*) (ver Capítulos 3.4.3; 4.4.4. y 5.4.2) (1, 22, 24, 36).

En la Figura 6.3 se ofrecen los modelos del ciclo de P para los sistemas agroforestales arriba indicados a la edad de cinco años. Para ellos se han considerado los siguientes valores de fósforo.

- Acumulación en la biomasa de café y poró a los 4,5 años, de laurel a los cinco años y en el suelo al inicio del experimento (1977).
- Producción de residuos vegetales naturales y de podas durante el quinto año experimental.
- Cosechas de café en el quinto año experimental.
- Aplicación de fertilizantes promedio del experimento, ingreso con el agua de lluvias para la región de Turrialba.
- Extracción del suelo para compensar las necesidades de crecimiento y producción de los sistemas.

En el Cuadro 5.10 se han presentado las concentraciones de P en los diferentes órganos de las especies de los sistemas y en la capa de mantillo. Se observa que los árboles de sombra, especialmente el poró, presentan mayores contenidos de P que los compartimentos de la biomasa del café. Igualmente el café bajo el poró presenta en todos los órganos valores más altos que bajo el laurel. Los valores en las raíces no fueron diferenciados entre especies. La capa de mantillo tiene un valor promedio comparable a la mezcla de las hojas que paulatinamente caen al suelo.

De la Figura 6.3. se pueden tomar los valores de acumulación de P en los sistemas resumidos en el Cuadro 6.4.

Cuadro 6.4. Reservas de P acumuladas en la biomasa y el suelo de los sistemas de café con laurel y café con poró ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; según Alpízar *et al.*, 1; Fassbender *et al.*, 22).

	Café con laurel		Café con poró	
Hojas	1,7	5,4	2,9	12,6
Ramas	4,1	6,0	4,5	11,6
Tallos	4,5	12,0	8,7	5,4
Raíces finas		4,5		3,3
Vegetación		38,2		49,1
Mantillo		7,4		10,1
Suelo (0-45 cm)		2736,0		2997,0
TOTAL		2781,0		3056,0

Las cantidades de fósforo acumuladas en la vegetación son pequeñas en comparación con otros elementos nutritivos, por ejemplo el nitrógeno. Sin embargo, existen diferencias grandes entre los sistemas estudiados; la asociación del café con poró logró un valor total de $49,1 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$, superando a la asociación con laurel ($38,2 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$). Esto se refleja también en la extracción del P con las cosechas, que equivale a $5,9$ y $1,7 \text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ en los sistemas respectivos.

Las mayores reservas de P en los sistemas en estudio se encuentran en los suelos. La absorción de P por los sistemas es paulatina. De acuerdo con Fassbender *et al.* (14, ver también 17) la disponibilidad de P del suelo experimental (Serie Instituto) es baja en función del contenido de P y de sus formas (P-org. 70%; Fe-P 8,4; Al-P 4,2 y Ca-P 1,7% de P-total).

Las diferencias del P en el suelo (2736 y $2997 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 45 cm) en los sistemas café/laurel y café/poró respectivamente) pueden considerarse dentro del error analítico del análisis de P en las muestras en estudio. Los coeficientes de variabilidad de las determinaciones de P tanto en el material vegetal (20 a 40%) como en el suelo (40-50%) son bastante elevados. La digestión ácida de los materiales vegetales y especialmente de los suelos conducen a tales diferencias.

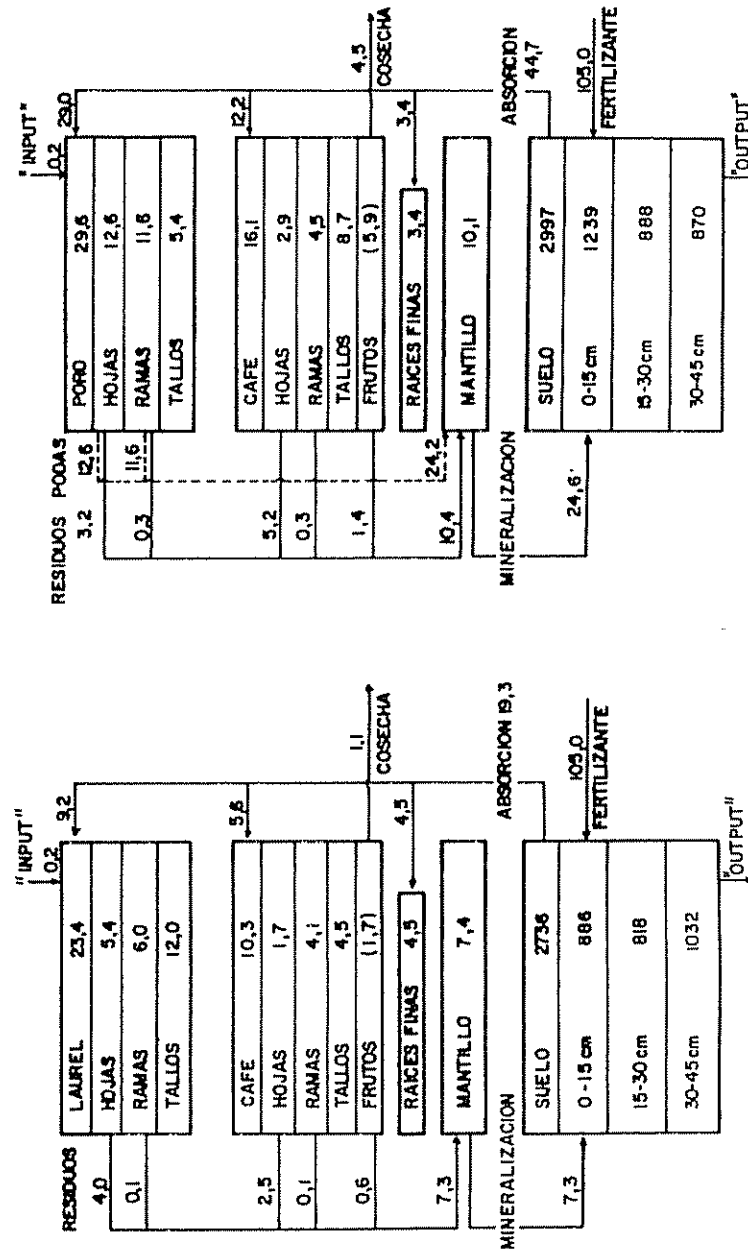


Figura 6.3. Modelos del ciclo de fósforo en los sistemas agroforestales de café con laurel y café con poró en Turrialba, Costa Rica (reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; Alpizar et al, 1; Fassbender et al, 22; Heuvelodp et al, 36).

La dinámica del P de los sistemas estudiados se caracteriza en los procesos de transferencia, especialmente en la producción y mineralización de los residuos, las cosechas y la absorción a partir del suelo (Figura 6.3). El contenido de P en los residuos vegetales (Cuadro 5.12) es comparable al de los órganos frescos (Cuadro 5.10). La transferencia de P con los residuos naturales en el quinto año experimental alcanzó 7,3 y 10,4 kg P.ha⁻¹.a⁻¹ para los sistemas café/laurel y café/poró. En función de tres años de estudio de este proceso (Heuvel dop *et al.*, 36) se han encontrado así valores a largo plazo de respectivamente 9,5 y 13,3 kg P.ha⁻¹.a⁻¹. Las podas del poró contribuyen notablemente (24,2 kg.ha⁻¹.a⁻¹) en el reciclaje de P.

Comparando los valores del reciclaje del P con los de las cosechas se constata que el reciclaje es mayor que la exportación. Así el funcionamiento de la nutrición fosfatada se garantiza con una circulación interna cerrada.

La extracción de P del suelo por los sistemas en el quinto año experimental se puede resumir como sigue (Figura 6.4; kg.ha⁻¹.a⁻¹):

	Café con laurel		Café con poró	
Biomasa aérea	5,6	9,2	12,2	29,0
Raíces finas	4,5		3,4	

La participación de la cosecha de los granos en la extracción de P del sistema de producción fue pequeña; alcanzó 1,1 y 4,5 kg P.ha⁻¹.a⁻¹ en las combinaciones con laurel y poró, respectivamente. La concentración de P en los granos de café (0,15% para ambos sistemas) es comparable a la encontrada en otros estudios.

Los valores de mayor acumulación de P en la biomasa y en las cosechas del sistema café con poró se pueden deber a la mayor actividad nutritiva (materia orgánica, nitrógeno, potasio) de esta combinación, así como también a la posible actividad de micorrizas en las raicillas del poró. López, *et al.* (48) han encontrado la ocurrencia de micorrizas en los suelos de la región cafetalera del estado de Sao Paulo en Brasil.

Las tasas de absorción del P son pequeñas en comparación con las reservas del suelo y la fertilización aplicada (240 kg P₂O₅ equivalente a 105 kg P.ha⁻¹). Estudios sobre las formas de P en la región de Turrialba han demostrado el predominio de fosfatos de hierro

y solubles en reductante que no son disponibles para las plantas (Fassbender *et al.*, 14). Por otro lado, se ha demostrado que los suelos del área de estudio tienen una capacidad de fijación de fósforo muy elevada, así, los fertilizantes aplicados se transforman en compuestos de baja solubilidad. Según Fassbender (17) el suelo de la Serie Instituto, donde se conduce el experimento, fija 62,2% del P ofrecido, especialmente en formas poco disponibles para las plantas (Al-P 67%, Fe-P 26%). Así la utilización del fertilizante es limitada.

El balance de fósforo del suelo se puede representar en la forma siguiente ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$):

	Café con laurel	Café con poró
<u>Ganancias</u>		
Fertilizante	105	105
Agua de lluvia	0,2	0,2
Residuos vegetales	7,3	34,6
TOTAL	112,5	139,8
<u>Pérdidas</u>		
Absorción	19,3	44,6
Filtración	0,5	0,5

Las fuentes de ganancia cubren completamente las pérdidas por absorción de las plantas. Sin embargo, hay que considerar en detalle los procesos de transformación del fertilizante aplicado. Además no hay duda que las pérdidas por lixiviación pueden ser importantes; para ello serán necesarios estudios específicos.

Un balance a largo plazo, no sólo de la acumulación de P en la biomasa, sino también de todos los procesos de transformación dentro del sistema llevaron a valores más confiables para la descripción de los sistemas en estudio.

6.4.3. Sistemas de cacao con árboles de sombra

En la literatura se ha encontrado información aislada sobre el ciclo del fósforo en sistemas de cacao (Theobroma cacao) asociado con

árboles de sombra (2, 4, 5, 6, 21, 26, 27, 37, 38, 39, 51, 59, 60). Con base en los datos obtenidos en el Experimento Central del CATIE en Turrialba, Costa Rica, se han publicado originalmente modelos del P de para los sistemas de cacao (T. cacao) con laurel (C. alliodora) o poró (E. poeppigiana) a la edad de cinco años (2, 21, 25, 26, 37). Posteriormente con base en estudios intensivos entre 1983 y 1987 se han preparado los modelos quinquenales del ciclo del fósforo para los mismos sistemas cacao/laurel (Cordia alliodora) y cacao/poró (Erythrina poeppigiana) presentados en la Figura 6.4. (5, 6, 26, 27, 38, 39). En detalle se han usado los siguientes valores:

- Reservas de P-total del suelo al inicio del experimento (1977) (2, 27).
- Acumulación de P en la biomasa como promedio de los valores a los 4,5 a cinco años de edad de los sistemas (2) y a los 10 años (27).
- Cosecha de cacao durante cinco años (1983-1987, 27) y de crecimiento del laurel (5, 6).
- Producción de residuos vegetales durante cinco años experimentales (nov. 1983 a oct. 1987) (39).
- Deposición con las aguas de lluvia medida en la cercanía de experimentos durante dos años (26, 35, 38) y lixiviación con el agua de percolación (38).
- Extracción de P del suelo para compensar la remoción con las cosechas, renovación anual de la biomasa.
- Aplicados como fertilizantes durante 1983-1987.

Los valores de la concentración de P en los diferentes órganos vegetales han sido presentados anteriormente (Cuadro 5.13). Tal como se esperaba el orden del contenido de P es hojas > ramas > tallos. En el caso de las hojas los valores para ambos sistemas en estudio son comparables, sin embargo, se observa que los valores para poró y laurel (ambos 0,24%) son más elevados que los de cacao (0,12%). El caso inverso se observa para los tallos en los cuales el cacao sobrepasa a los árboles de sombra.

Con base en los valores de la biomasa de los diferentes compartimentos (Cuadro 4.26) y su contenido de P (Cuadro 5.13) se han calculado las reservas de P en los sistemas en estudio. Los resultados obtenidos a la edad de cinco y 10 años se encuentran como su promedio en los modelos y han sido presentados en detalle en el Cuadro 6.5.

Los valores totales acumulados en la vegetación a los cinco y 10 años son comparables para los sistemas, incluyendo a la capa de mantillo la asociación cacao/laurel presenta un valor de 50,3 - 79,4 kg P.ha⁻¹ (5 - 10 años), la correspondiente de cacao/poró es de 36,5 - 70,4 kg P.ha⁻¹. Las reservas se encuentran especialmente en los árboles de sombra y especialmente en las ramas o tallos. Las diferencias entre los arbustos de cacao son pequeñas.

En comparación con otros elementos nutritivos, especialmente el nitrógeno (Cuadro 5.14) se constata que los valores de acumulación de P en la biomasa son relativamente pequeños.

Las reservas de P total en el suelo son elevadas y representan casi la totalidad de P de los sistemas (Figura 6.4) (99 %). Así se constata la estabilidad de P en los suelos; el P disponible que paulatinamente puede ser acumulado en la vegetación (ver Cuadro 6.2) es una fracción muy pequeña del P-total.

En los modelos del P (Figura 6.4) se han incluido los valores de los frutos entre paréntesis. Así se trata de mostrar que este valor representa una reserva de P extraída durante un año experimental. Las cosechas se realizan cada dos semanas y así entre frutos pequeños, en maduración y cosechables se tiene una biomasa dinámica con la acumulación y exportación progresiva de P.

Al evaluar la exportación de P con las cosechas se han diferenciado las semillas y el pericarpio (cáscara) de los frutos (Cuadro 5.17, Figura 6.4). Los valores de exportación de P del sistema son relativamente pequeños (6,6 y 6,3 kg P.ha⁻¹.a⁻¹, para cacao/laurel y cacao/poró respectivamente) para el sistema como tal, pero elevados para cultivar el cacao y las plantas del sistema agroforestal como tal. Así al comparar la extracción con las cosechas con la acumulación en la biomasa vegetal se tienen los siguientes valores:

	Cacao con laurel	Cacao con poró
Biomasa (kg.ha ⁻¹ .a ⁻¹)	79,4	70,4
Cosecha (kg.ha ⁻¹ .a ⁻¹)	6,6	6,3

Cuadro 6.5. Reservas de fósforo acumuladas en la biomasa de los sistemas cacao con laurel y cacao con poró (kg.ha⁻¹; según Alpizar *et al.*, 1; Beer *et al.*, 5, 6; Fassbender *et al.*, 21, 26, 27).

	Cacao con laurel			Cacao con poró		
5 AÑOS						
Hojas	3,5	8,1	3,4	3,9		
Ramas	5,2	9,0	3,9	6,5		
Tallos	3,6	11,8	2,5	5,5		
Raíces finas		4,2		2,3		
Mantillo		4,9		8,5		
Total vegetación		50,3		36,5		
10 AÑOS*						
Hojas	6,0	2,2	5,0	4,3		
Ramas	31,1	13,4	20,3	7,0		
Tallos	5,3	0,8	4,2	8,2		
Raíces finas		5,6		2,4		
Mantillo		15,0		14,0		
Total vegetación		79,4		70,4		

* Valores provisionales

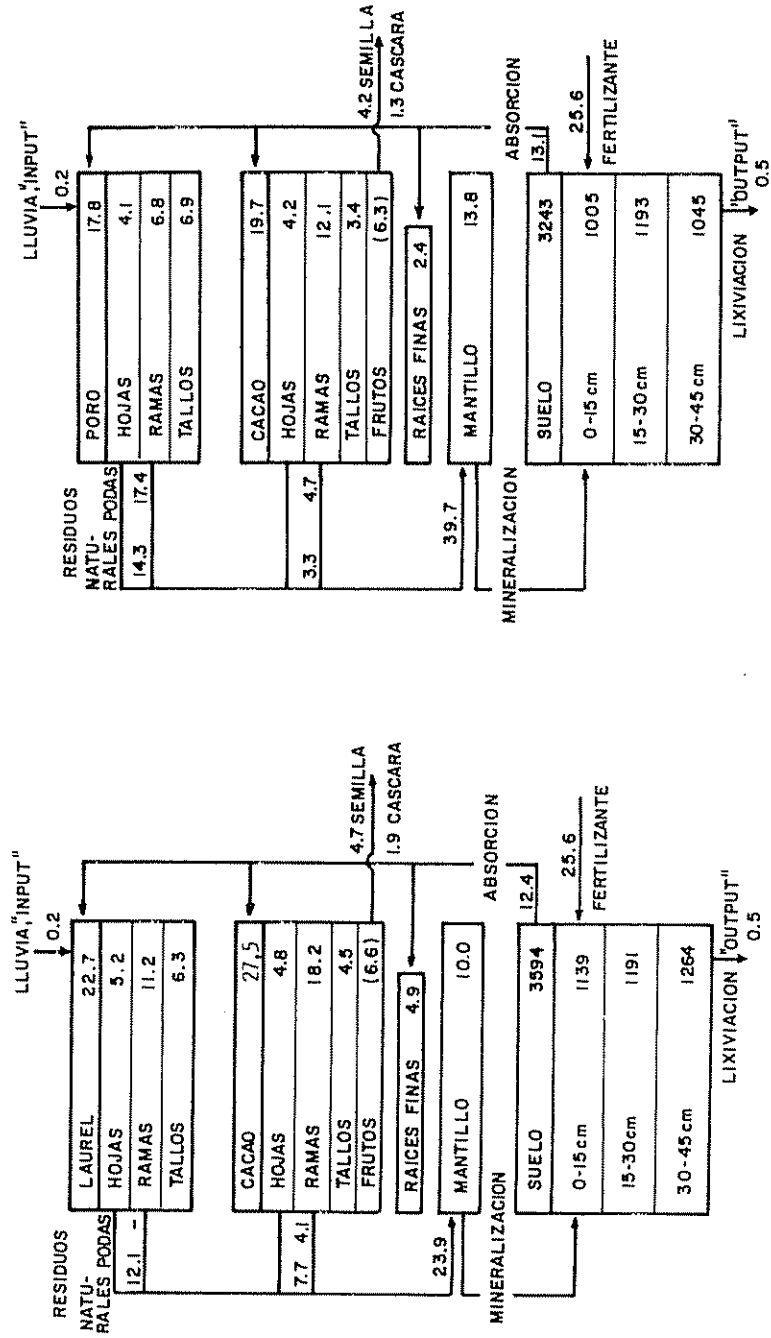


Figura 6.4. Modelos quinquenales (1983-1987) del ciclo del P en los sistemas agroforestales de cacao con laurel y cacao con poró en Turrialba, Costa Rica (reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; en base a valores de Alpizar et al., 2; Beer et al., 4, 5, 6; Fassbender et al., 26, 27; Heuvelink et al., 37; Imbach et al., 38, 39 y valores provisionales aún no publicados).

Del Cuadro 5.1 se desprende que las concentraciones de P en los residuos vegetales son bastante diferenciadas. Los valores de todos los materiales de hojarasca en la asociación cacao/poró son más bajos que en la asociación cacao/laurel. Por ello, aunque las cantidades de residuos producidos son más o menos comparables (Cuadro 4.29), resultan tasas de transferencia bastante diferenciadas entre los sistemas (Cuadro 6.6, Figura 6.4), especialmente por las podas en cacao/poró. El sistema cacao/laurel alcanzó un total de 23,9 kg P.ha⁻¹.a⁻¹, el valor respectivo para el sistema cacao/poró es de 39,7 kg P.ha⁻¹.a⁻¹. En base a la observación de que la descomposición y mineralización de los residuos se logra en un año, se han incluido en los modelos los valores respectivos.

Cuadro 6.6. Transferencia de P con los residuos naturales y de podas en los sistemas cacao/laurel y cacao/poró (según Imbach *et al.*, 39; kg.ha⁻¹.a⁻¹).

	Cacao/laurel	Cacao/poró
Residuos naturales		
Edad del sistema		
6	8,9	8,9
7	13,8	14,6
8	26,5	28,5
9	19,8	18,4
10	29,8	17,8
Promedio		19,8 17,6
Residuos de podas		
Edad del sistema		
9	4,1	22,1
10		
TOTAL	23,9	39,7

Al comparar los valores de P de las cosechas con el reciclaje con los residuos vegetales se obtienen los siguientes valores (kg.ha⁻¹.a⁻¹; Figura 6.4):

	Cacao con laurel	Cacao con poró
Cosechas	6,6	6,3
Residuos	23,9	39,7
Residuos: cosechas	3,5	2,1

Por tanto el reciclaje sobrepasa a la exportación especialmente en la asociación cacao/poró. Así la dinámica de este elemento se garantiza prácticamente en forma interna. Sin embargo para las necesidades totales de P de los sistemas en estudio hay que considerar la acumulación en la biomasa.

Con la aplicación de fertilizantes fosfatados ($25,6 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$) se compensan prácticamente la extracción por las asociaciones agroforestales. Sin embargo a través del proceso de fijación de P (Capítulo 6.3.2) se pueden esperar cambios del P aplicado a formas no disponibles para las plantas. Según Fassbender (17) el suelo experimental fija 62,2 % del P ofrecido, especialmente en formas poco disponibles para las plantas (Al-P 67; Fe-P 26%). Por tanto, la utilización de P del fertilizante puede ser limitante.

6.4.4. Sistemas de praderas bajo árboles de sombra

- Pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*) bajo laurel (*Cordia alliodora*) y poró (*Erythrina poeppigiana*)

Los aspectos generales sobre este sistema, estudiado en el Experimento Central del CATIE, Turrialba, Costa Rica, han sido descritos anteriormente (ver Capítulo 3.4.3; 4.4.4; 5.4.5) El estudio de los ciclos de los elementos nutritivos implica por un lado su determinación en los diferentes compartimentos del sistema y multiplicándolos con las reservas de materia seca se obtienen las reservas nutritivas acumuladas; por otro lado es necesario conocer sus transferencias las cuales se calculan igualmente multiplicando la concentración y la masa de materia (residuos, cosechas, agua, etc.).

De acuerdo con Alpizar (3) las reservas de P acumuladas en la vegetación y en el suelo se resumen de la siguiente manera ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$):

	Pasto estrella bajo laurel	Pasto estrella bajo poró
Biomasa en pie	44,2	16,6
Rafces finas	4,3	1,1
Capa mantillo	3,3	2,8
Suma	51,8	20,5
Suelo (0-45 cm)	3136	2536
Total del sistema	3187,8	2556,5

Como fue encontrado en otros sistemas agroforestales (café y cacao asociados con laurel y poró, Capítulo 6.4.2. y 6.4.3.) la acumulación de P en la vegetación es muy paulatina, las mayores reservas se encuentran en los suelos. Las diferencias entre ellos pueden ser explicables por el manejo anterior al inicio del experimento.

En el Cuadro 5.20 se han resumido los resultados del análisis químico de los elementos nutritivos en el pasto estrella. En función de la producción y del contenido de P se pueden calcular los siguientes valores de exportación de N del sistema ($\text{kg P}\cdot\text{ha}\cdot 4\text{a}^{-1}$):

	Materia seca $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 4\text{a}^{-1}$	Contenido P $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$	Exportación $\text{kg P}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 4\text{a}^{-1}$
Pasto sólo	67,7	2,3	155,7
Pasto bajo laurel	46,9	3,1	145,4
Pasto bajo poró	72,9	2,2	160,4

Las cantidades de P extraídas por el pasto de las tres asociaciones (con y sin sombra) son más o menos comparables (145 a 160 $\text{kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$) en cuatro años). Como se trata de un pasto de corte, la extracción implica una exportación de este elemento.

Comparando la acumulación de P en la biomasa de los árboles y la exportación con el pasto se concluye que la especie pastoril extrae del suelo cantidades notables de P, utilizando gran parte de las reservas disponibles de P.

La remoción anual de P del pasto estrella se encuentra dentro del ámbito encontrado para otros pastos de corte (Cuadro 4.13). De acuerdo con los resultados obtenidos por Rodríguez (55), la extracción de P de "king-grass" bajo sombra de poró es mayor ($70\text{ kg P}\cdot\text{ha}^{-1}$) que la del pasto estrella (Cuadro 5.22).

Un aspecto limitante para la interpretación de los resultados exhaustivos de P del suelo y de su reciclaje en el sistema silvopastoril, es la falta de la determinación de la biomasa radicular y su fenología. El crecimiento, desarrollo, muerte y descomposición de raíces finas del pasto contribuye sin duda en el ciclo del fósforo, como en el ciclo de otros elementos nutritivos.

En la literatura no se han encontrado informaciones completas sobre el ciclo de P en sistemas agrosilvopastoriles de pastoreo directo.

De acuerdo con Spain y Salinas (61) la participación de los animales implica la exportación de P con los productos pecuarios y el reciclaje con las excreciones (heces y orina). El contenido de P en la carne de becerros, novillos, corderos y ovejas es de 6,71; 6,76; 4,93 y 4,53 kg P.t⁻¹. La leche de vaca contiene 1 kg P.1000 l⁻¹. Con los productos animales se exportan de 1 a 10 kg P.ha⁻¹.a⁻¹, dependiendo de la producción de la pastura y la carga animal (61).

6.4.5. Sistemas de cultivo en callejones ("alley cropping")

La información sobre inventarios del fósforo y su transferencia en sistemas agroforestales de cultivos en callejones es muy limitada (4, 45, 49, 51, 56, 58, 62, 66). La ventaja de las especies arbóreas está ligada al reciclaje de P con los residuos vegetales; la presencia de micorrizas para una mejor absorción de P ha sido verificada para sólo algunas especies (48).

Como fue indicado anteriormente, el P es muy estable en los suelos; las cantidades acumuladas en los árboles y/o cultivos es pequeña y con ello las tasas de deposición en el suelo.

En el experimento de cultivo en callejones del CATIE, Kass *et al* (45) han indicado que a la edad de 66 meses sin fertilización nitrogenada *Erythrina poeppigiana* y *Gliricidia sepium* han acumulado 18 y 19 kg P.ha⁻¹ respectivamente. Sánchez (58) indica que la acumulación de P en el poró depende de su distanciamiento disminuyendo de 30,1 (arreglo 6 x 1 m) a 13,6 (distanciamiento 6 x 4 m) kg de P.ha⁻¹ (Figura 6.5).

Los cultivos de maíz acumularon cantidades comparables de P (30 a 34 kg.ha⁻¹). La interpretación de los valores de P en el suelo es difícil pues se trata de reservas de P disponibles (determinación con el método de Olsen) y no de P-total como en los modelos presentados en las Figuras 6.3 y 6.4 (Fassbender *et al*, 26, 27).

En los estudios realizados en ultisol de Yurimaguas, Perú, Szott *et al* (62) han encontrado que la transferencia de P con residuos de poda (2,5 t.ha⁻¹.a⁻¹) oscila entre 5 y 7 kg P.ha⁻¹.a⁻¹ para las especies *Inga edulis*, *Gliricidia sepium*, *Erythrina spp.* y *Cassia reticulata*.

Para las condiciones del ultisol en Nigeria, Lal (49) ha indicado que la disminución del P disponible (método de Bray) no es tan severa como la del nitrógeno (Capítulo 5.4.5) o de humus (Capítulo 4.4.6); ello debido a la baja capacidad de fijación de P en el suelo experimental.

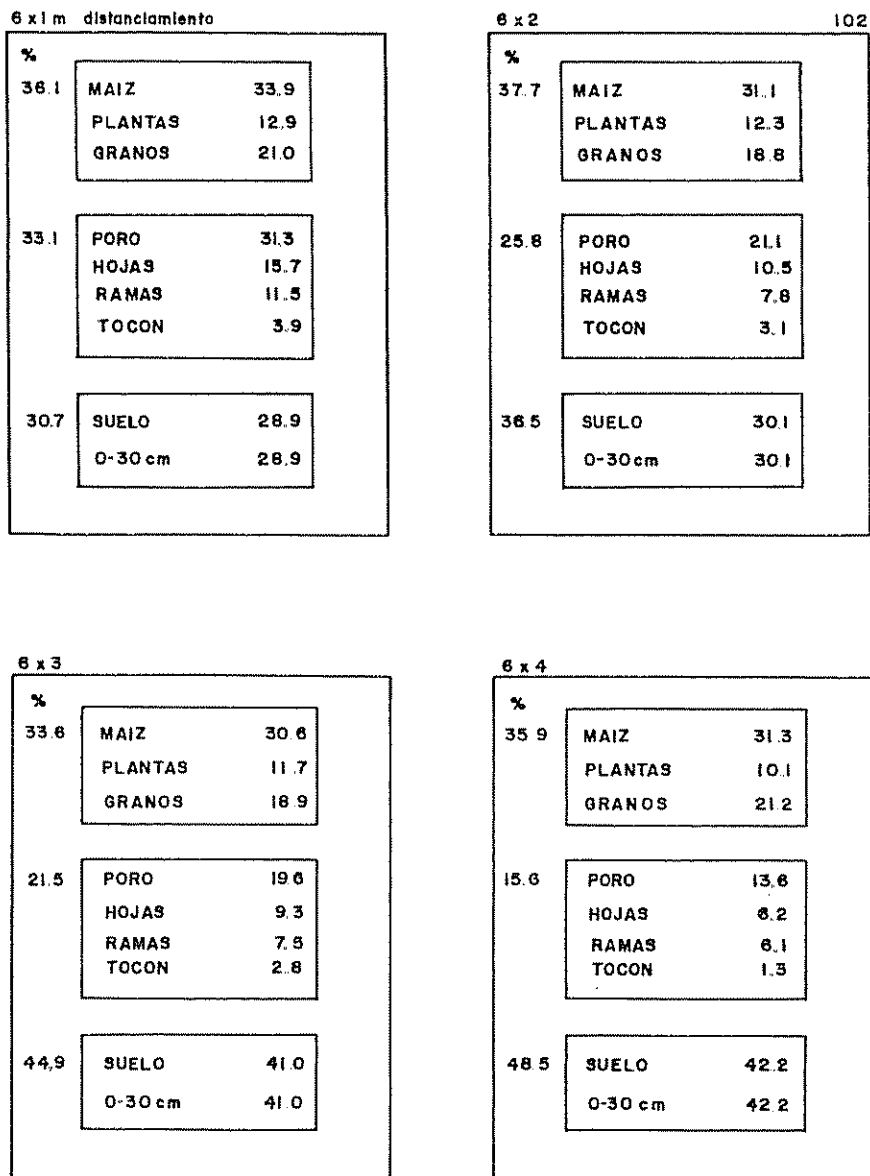


Figura 6.5. Reserva y transferencia de P en el experimento de cultivos de maíz en callejones de poró (*Erythrina poeppigiana*) en CATIE, Costa Rica ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) (Sánchez, 58).

Como fue indicado en capítulos anteriores existe una necesidad muy grande de investigaciones sobre el ciclo del P en muchos sistemas agroforestales y detalles específicos sobre el comportamiento de este elemento nutritivo.

RESUMEN

- Del contenido y las formas P en los suelos resulta una estabilidad muy notable de este elemento en la naturaleza, especialmente en suelos ácidos y evolucionados.
- La acumulación de P en la biomasa de ecosistemas naturales es muy variable, solo existe información de pocos estudios. Generalmente la mayor reserva de P de los ecosistemas se localiza en los suelos. Sin embargo en determinados ecosistemas las reservas vegetales son mayores que las del suelo resultando una vulnerabilidad grande de los mismos.
- Con base en los datos de reservas y transferencias de P se presentan modelos para los ecosistemas de llanura en Darién, Panamá y los ecosistemas montanos andinos de Mérida, Venezuela.
- Las necesidades de P de los cultivos es generalmente menor que la de otros elementos nutritivos. Sin embargo las deficiencias de P son muy comunes por la baja disponibilidad y su transformación en el suelo.
- Se discuten los problemas de la fijación de P y la utilización de fertilizantes fosfatados orgánicos, naturales e industriales.
- Se presentan datos de ciclos de P en plantaciones forestales como Pinus caribaea, Pinus patula y Cupressus lusitanica en diferentes condiciones. Los pocos datos encontrados implican una necesidad de investigación grande.
- El ciclo de P en sistemas agroforestales se ilustra con resultados obtenidos para asociaciones de café/laurel y café/poró. Su acumulación en la biomasa es pequeña y paulatina, en comparación con las reservas del suelo. El reciclaje (producción, descomposición y reciclaje de residuos) es mayor que la exportación con las cosechas.

- El modelo de P para los sistemas de cacao con árboles de sombra (laurel y poró) se basan en mediciones a largo plazo (cosecha siete años), producción de residuos vegetales (cuatro años).
- Se presentan algunos datos sobre el P en sistemas agrosilvopastoriles de "corta y lleva" de los pastos y se hacen consideraciones en sistemas de pastoreo directo.
- Se discuten algunos resultados del ciclo de P (acumulación y transferencia) en sistemas de cultivos en callejones.

LITERATURA

1. ALPIZAR, L. et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) y café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. I. Biomasa y reservas nutritivas. Turrialba (C.R.) 35:233-242.
2. _____ . et al. 1986. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with Cordia alliodora and Erythrina poeppigiana in Costa Rica. I. Inventory of organic matter and nutrients. Agroforestry Systems (Holanda) 4:231-257.
3. _____. 1986. Results of association of pastures with shade trees at Central Experiment of CATIE. In Advances in Agroforestry Research (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. Ed. by J.W. Beer; H.W. Fassbender; J. Heuvelodp. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. p. 209-215.
4. BEER, J.W.; FASSBENDER, H.W.; HEUVELDOP, J. (eds.). 1987. Advances in Agroforestry Research (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. 379 p.
5. _____ . et al. 1990. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with Cordia alliodora and Erythrina poeppigiana in Costa Rica. V. Productivity indices, organic matter models and sustainability over ten years. Agroforestry Systems (Holanda) 12:229-240.

6. _____, et al. 1990. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with Cordia alliodora and Erythrina poeppigiana in Costa Rica. V. Productivity indices, organic matter models and sustainability over ten years. *Agroforestry Systems* (Holanda) 12:229-240.
7. BERNHARD-REVERSAT, F. 1972. Decomposition de la litiere de fuiuilles en foret ombrophylle de basse Cote-d'Ivoire. *Oecologia Plantarum* (Francia) 7:279-300.
8. BOYER, J. 1973. Cycles de la matiere organique et des element mineraux dans une cacaoyere camerounaise. *Cafe, Cacao, The* (Francia) 17:2-23.
9. BRUIJNZEEL, L.A.; WIERSUM, K.F. 1985. A nutrient balance sheet for Agathis dammara Warb. plantation forest under various management conditions in Central Java, Indonesia. *Forest Ecology and Management* (Holanda) 10:195-208.
10. COMMITTEE ON TROPICAL SOILS (EE.UU.). 1972. Soils of the humid tropics. Washington, D.C., EE.UU., National Academy of Sciences. s.p.
11. EDWARDS, P.J. 1977. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. II. The production and disappearance of litter. *Journal of Ecology* (G.B.) 65:971-992.
12. _____; GRUBB, P.J. 1977. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. *Journal of Ecology* (G.B.) 65:943-969.
13. EGUNJOBI, J.K.; BADA, S.O. 1979. Biomass and nutrient distribution in stands of Pinus caribaea in the dry zone of Nigeria. *Biotropica* (EE.UU.) 11:130-135.
14. FASSBENDER, H.W.; MULLER, L.; BALERDI, F. 1968. Estudio del fósforo en suelos de América Central. II. Formas y su relación con las plantas. *Turrialba* (C.R.) 18:333-347.
15. _____. 1969. Deficiencia y fijación de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas en América Central. In *Panel sobre Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas de América Latina*. Turrialba, C.R., IICA. p. B. 4.1-B. 4.10.

16. _____; MULLER, L.; BALERDI, F. 1969. Estudio del fósforo en suelos de América Central. IV. Capacidad de fijación de fósforo y su relación con características edáficas. Turrialba (C.R.) 19:497-505.
17. _____. 1969. Phosphorus fixation in tropical soils. Agri Digest (Bélgica) 18:20-28.
18. _____.; DIAZ, N. 1970. Contenido y formas de fósforo de algunos suelos de la región amazónica del Estado de Maranhao, Brasil. Turrialba (C.R.) 20:372-374.
19. _____.; GRIMM, U. 1981. Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. II. Producción y descomposición de residuos vegetales. Turrialba (C.R.) 31:39-47.
20. _____.; GRIMM, U. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. IV. Modelos y conclusiones. Turrialba (C.R.) 31:101-108.
21. _____. et al. 1985. Ciclos de la materia orgánica y elementos nutritivos en cultivos tropicales permanentes, experiencias con cacao. In Seminar on Nutrient Research and Low Input Agriculture for the Tropics. Anais. Ed. por P. Cabala. Itabuna, Bra., CEPLAC. p. 231-257.
22. _____. et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora), café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. III. Modelos de la materia orgánica y elementos nutritivos. Turrialba (C.R.) 35:403-413.
23. _____.; BORNEMISZA, E. 1987. Química de suelos. San José, C.R., IICA. 420 p.
24. _____.; ALPIZAR, L. 1987. Criteria for the evaluation of organic matter and nutrient cycling in agroforestry systems. In Advances in Agroforestry Research (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. Ed. by J.W. Beer; H.W. Fassbender; J. Heuveldop. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. p. 91-103.

25. _____. 1987. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. CATIE. Serie de Materiales de Enseñanza no. 29. 475 p.
26. _____. *et al.* 1988. Modelling 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) 6:49-62.
27. _____. *et al.* 1991. Ten years balances of organic matter and nutrients in agroforestry systems at CATIE, Costa Rica. *Forest Ecology and Management* (Holanda) 45:173-183.
28. FÖLSTER, H.; KHANNA, P. 1976. A tropical evergreen forest site with perched water table, Magdalena Valley, Colombia. *Oecologia Plantarum* (Francia) 11:298-320.
29. _____.; SALAS, G. DE LAS. 1976. Litter fall and mineralization in three tropical evergreen forest stands, Colombia. *Acta Científica de Venezuela* (Ven.) 37:192-202.
30. GOLLEY, F.B. *et al.* 1975. Mineral cycling in a tropical moist forest ecosystem. Athenas, EE.UU., University of Georgia Press. 248 p.
31. GREENLAND, D.J.; KOWAL, J.M.L. 1960. Nutrient content in a moist tropical forest of Ghana. *Plant and Soil* (Holanda) 12:154-174.
32. GRIMM, U.; FASSBENDER, H.W. 1981. Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. I. Inventario de las reservas orgánicas y minerales (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Al, Na). *Turrialba* (C.R.) 31:27-37.
33. _____. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. III. Ciclo hidrológico y translocación de elementos químicos con el agua. *Turrialba* (C.R.) 31:89-99.
34. HASE, H.; FÖLSTER, H. 1982. Bioelement inventory of a tropical (semi) evergreen seasonal forest on eutrophic soils, Western Llanos, Venezuela. *Oecologia Plantarum* (Francia) 17:331-346.

35. HENDRY, C.D.; BERISH, C.W.; EDGERTON, E.S. 1984. Precipitation chemistry at Turrialba, Costa Rica (Central America). s.l., EE.UU., Water Resources Research. s.p.
36. HEUVELDOP, J. et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) y de café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. II. Producción agrícola, maderable y de residuos vegetales. Turrialba (C.R.) 35:347-355.
37. _____, et al. 1988. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with Cordia alliodora and Erythrina poeppigiana in Costa Rica. II. Cacao and wood production; litter production and decomposition. Agroforestry Systems (Holanda) 6:37-48.
38. IMBACH, A. C. et al. 1989. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with laurel (Cordia alliodora) and poró (Erythrina poeppigiana) in Costa Rica. IV. Water balances, nutrient inputs and lixiviation. Agroforestry Systems (Holanda) 8:267-287.
39. _____; FASSBENDER, H.W.; BEER, J.W. 1992. Producción de residuos vegetales de cacao (Theobroma cacao) con laurel (Cordia alliodora) y con poró (Erythrina poeppigiana) en Costa Rica. Theobroma (Bra.). (sin publicar).
40. JORDAN, C.F. 1982. The nutrient balance of an Amazonian rain forest. Ecology (EE.UU.) 63(3):647-654.
41. _____. 1981. Biogeochemical cycles and tropical forest. The American Naturalist (EE.UU.) 117:167-180.
42. _____; ESCALANTE, G. 1980. Root productivity in Amazonian rain forest. Ecology (EE.UU.) 61:14-18.
43. _____; HERRERA, R. 1981. Tropical rain forest: are nutrients really critical? The American Naturalist (EE.UU.) 117:167-180.
44. _____. 1985. Nutrient cycling in tropical forest ecosystems. New York, EE.UU., J. Willey. 190 p.
45. KASS, D.L. et al. 1989. Resultados de seis años de investigación de cultivo en callejones (alley cropping) en "La Montaña", Turrialba, Costa Rica. El Chasqui (C.R.) no. 19:5-24.

CAPITULO SETIMO

CICLOS DEL POTASIO, CALCIO, MAGNESIO Y ALUMINIO

7.1. Elementos metálicos en el suelo

7.1.1. Contenido y formas

El contenido de K, Ca, Mg y Al en la corteza terrestre (litosfera) es elevado, equivaliendo al 2,6, 3,7, 2,1 y 8,1 % respectivamente. La distribución del contenido total de estos elementos en el suelo sigue un esquema geomorfológico en función de las rocas y de los minerales parentales de los suelos (12, 20, 23, 53).

Las rocas se dividen en tres grupos: magmáticas, sedimentarias y metamórficas. Estas rocas difieren en sus contenidos de silicatos, aluminosilicatos, sulfatos, fosfatos, cloruros, etc., cuya solubilidad o inestabilidad es creciente en el orden en que se han nombrado.

Las rocas magmáticas pueden clasificarse de acuerdo con su contenido de sílice como rocas ácidas ($\text{SiO}_2 > 66\%$), subácidas (SiO_2 entre 66 y 62%), sub-básicas (SiO_2 entre 62 y 52%) y básicas (SiO_2 entre 52 y 45%) (20).

El óxido de sílice o cuarzo es un cristal muy estable por ser tridimensional en función de los enlaces entre Si y O. Por ello resulta inerte en cuanto a elementos nutritivos se refiere. Las playas de arena blanca son grandes acumulaciones de cuarzo. La arena negra debe su color al óxido de titanio que contiene. El granito es una roca ácida típica con un contenido adecuado de potasio pero bajo en calcio y magnesio. La ortoclasa y la muscovita contienen mucho potasio. Las rocas alcalinas como el basalto y la dolerita provienen de erupciones volcánicas relativamente recientes. Se caracterizan por su contenido de plagioclasa y olivino, minerales con cantidades adecuadas de calcio y magnesio. Contienen además anfíbol y piroxeno. Todo ello contribuye a que el suelo que se desarrolla a partir de estas rocas posea buena fertilidad (20).

Los silicatos (SiO_4^-) pueden estar arreglados en forma simple como en el olivino o formar anillos, cadenas dobles y láminas como en la muscovita. Los aluminosilicatos se originan por la sustitución isomórfica del silicio por el aluminio. Ambos elementos poseen átomos de radio similar por lo que se dan "anomalías" de fórmula general (AlSiO_4). Como el sílice substituido es tetravalente en tanto el aluminio

sustituyente es trivalente, los aluminosilicatos poseen cargas negativas. A este grupo de minerales pertenecen, entre otros, la biótita, la anfíbola y el piroxeno, así resultan minerales que se meteorizan liberando K, Ca y Mg.

Las rocas sedimentarias son producto de la meteorización de las rocas magmáticas y del ulterior transporte a otro lugar. Existen otros sedimentos como los químicos y biológicos (20).

Los sedimentos químicos presentan condiciones que favorecen la formación de sales. Así pues, se forma la roca de yeso (sulfato de calcio) y la roca caliza (carbonato de calcio). Los sedimentos biológicos son formados por acumulación de restos orgánicos como las conchas marinas que originan calizas. El contenido de K, Ca y Mg depende de la roca primaria y del proceso de sedimentación.

Las rocas metamórficas se forman a temperaturas mayores de los 500°C y bajo presiones altas a partir de rocas magmáticas o sedimentarias. Estas condiciones transforman el arreglo original de los minerales de las rocas primarias. Ejemplo de ello son las pizarras, cuarcitas y el mármol. La transformación debida a alta temperatura implica la pérdida de todo el material orgánico presente y, con ello, la organización de un nuevo arreglo cristalino. Todo lo anterior evidencia la importancia de consultar los mapas geológicos cuando se desea explicar las diferencias existentes entre los suelos.

La mayor parte del contenido de estos elementos en su forma estructural nativa (minerales primarios) y pedogenética (minerales secundarios) participa indirectamente en los ciclos biogeoquímicos a través del proceso de meteorización y de formación de otras fracciones de mayor dinámica. A través de los procesos de intercambio en las superficies electrostáticas de las arcillas, materia orgánica y sesquióxidos resultan reservas las cuales se encuentran en equilibrio con la solución del suelo.

Cada una de las formas o fracciones (total, estructural, cambiante, solución del suelo) actúa como una reserva separada, definida y cuantificable con una participación definida en el ciclo de estos elementos.

Tanto el potasio como el calcio y el magnesio son absorbidos por las plantas en sus formas iónicas a partir de la solución del suelo. El potasio es un elemento alcalino y monovalente, K^+ ; el calcio y el magnesio son alcalinotérreos y bivalentes: Ca^{2+} , Mg^{2+} . Este grupo de iones de la solución del suelo puede ampliarse con el sodio Na^+ ,

como un elemento nutritivo facultativo. Por su parte el aluminio aparece en la solución del suelo en su forma trivalente, Al^{3+} , aunque existen sus formas pliméricas de composición y cargas electrostáticas variables. El hidrógeno se presenta en la solución del suelo en forma de H_3O^+ . En la solución del suelo existen concentraciones variables, pero generalmente pequeñas de otros elementos metálicos (hierro, cobre, zinc, manganeso, etc.) (20, 23, 52).

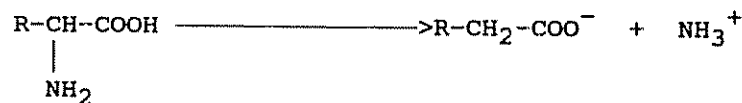
El potasio, sodio, calcio y magnesio regulan el intercambio hídrico, de las células, estos cationes se encuentran dentro de la vacuola celular. Puesto que el sodio y el potasio son hidrofílicos, en tanto, el calcio y el magnesio son hidrofóbicos, la concentración relativa de estos elementos determina la turgencia (presión contra las paredes celulares) y la presión osmótica. Cuando las dos presiones se igualan la célula no gana ni pierde agua. Estos elementos nutritivos juegan un papel fisiológico importante en la planta formando enzimas, coenzimas, pigmentos (clorofila).

Las plantas absorben estos elementos selectivamente, son tomados de la solución del suelo por los "carrier" y llevados al interior de la raíz bajo utilización de energía en la captura y transporte. Además existe la absorción pasiva en la cual, los elementos ingresan a las raíces disueltos en el agua que consume la planta para compensar la pérdida de la misma por transpiración. Así las plantas absorben aluminio y otros elementos químicos, en parte tóxicos.

7.1.2. Los procesos de intercambio catiónico

Las arcillas, la materia orgánica y los óxidos presentan cargas negativas que son compensadas por la absorción superficial de elementos electropositivos. Las cargas negativas de las arcillas provienen de la sustitución isomórfica del sílice por el aluminio, ya mencionado. Las cargas electrostáticas negativas se compensan con cationes a través de sus cargas electrostáticas positivas, resultando un equilibrio químico (20, 23).

Las sustancias húmicas pueden formar cargas negativas, así los aminoácidos después de la amonificación disocian y el ácido húmico resultante tiene una carga negativa.



aminoácidos

Acido + Amonio

La capacidad de intercambio catiónico - CIC de las sustancias húmicas es elevada, variando entre 100 y 250 c mol.kg⁻¹ (20). La capacidad de intercambio de las arcillas es variable (Cuadro 7.1).

Cuadro 7.1. Capacidad de intercambio de algunos minerales arcillosos, óxidos amorfos y materia orgánica (según Fassbender y Bornemisza, 20).

Mineral	Capacidad de cambio (c mol.kg ⁻¹)		
Caolinita	3	-	15
Haloisita	5	-	10
Montmorilonita	80	-	120
Vermiculita	100	-	150
Glauconita	5	-	40
Halloicita	20	-	50
Clorita	10	-	40
Alófana			100

Opalo	11	-	34
Oxido Fe amorfo	10	-	25

Materia orgánica	100	-	250

La caolinita tan solo tiene una capacidad de cambio de 3 a 5 c mol.kg⁻¹ en tanto la vermiculita es capaz de cambiar 100 a 150 c mol.kg⁻¹. La materia orgánica posee la capacidad de intercambio catiónico más alta (100 - 250 c mol.kg⁻¹). Los óxidos de hierro y manganeso también forman cargas negativas de intercambio catiónico débil. Además, ambos óxidos, debido a sus múltiples valencias, pueden cargarse positivamente o incluso no tener carga (punto isoeléctrico). Este último estado produce la filtración de las arcillas con la ulterior formación de horizontes argílicos y la redistribución de la materia orgánica a través del perfil. Finalmente, la alófana, un mineral amorfo derivado de las cenizas volcánicas, posee una CIC de alrededor de 100 c mol.kg⁻¹.

El pH juega un papel muy importante en los procesos de intercambio catiónico. Inicialmente los cationes liberados mantienen un pH neutral o ligeramente ácido. Progresivamente la planta extrae nutrimentos y el suelo se acidifica, porque los sitios de absorción que se

desocupan en las arcillas son llenados por iones hidronio. Estos iones provienen de las excreciones radiculares de la planta y de la reacción de dióxido de carbono liberado por la respiración radicular con el agua. Además la lluvia produce agua de filtración que arrastra cationes porque su pobreza en electrolitos inclina el equilibrio hacia la liberación catiónica. Los suelos con mayor contenido de bases cambiables poseer valores de pH neutros. El cambio progresivo de estas bases por aluminio disminuye el pH. Así, un 20% de saturación de bases asociado a un pH de cuatro indica que el complejo de intercambio está ocupado en un 80% por hidrógeno y aluminio, esto es, la llamada acidez cambiante.

7.1.3. El encalado de los suelos

Los suelos de áreas tropicales presentan, por lo arriba indicado, una tendencia de acidificación. Valores bajos de pH son desfavorables ya que implican (8, 20, 23):

- disminución de la disponibilidad de K, Ca y Mg
- peligro de toxicidad de Al, Mn y boro
- deficiencias de cobre, zinc y molibdeno
- disminución de la actividad microbiana
- limitación de la descomposición de residuos vegetales y formación de sustancias húmicas
- fijación notable del fósforo en formas térmicas y aluminicas
- pérdida en la estabilidad de los agregados.

Para controlar la acidez del suelo es necesario encalar, la dosis de cal adecuada puede determinarse basadas en el contenido de aluminio extraíble. Existe una relación inversa existente entre dosis progresivamente mayores de cal y el aluminio extraíble.

El efecto del encalado sobre la acidez y las bases cambiables en un suelo evidencian el efecto benéfico del encalado sobre el complejo de intercambio. Conforme se aumenta la cantidad de cal agregada, la acidez intercambiable es menor porque la participación del calcio y el magnesio en el complejo aumenta notoriamente.

El encalado aumenta la productividad de los suelos, sin embargo un exceso de cal resulta perjudicial por el desbalance nutritivo resultante (potasio, elementos menores).

La cal agregada al suelo atraviesa su perfil progresivamente. Esto conlleva a la formación de un frente de cal que, eventualmente, estará por debajo de la zona radicular siendo necesario entonces un nuevo encalado de ese suelo. El hecho de que la cal no esté disponible en todas las zonas del trópico determina que su uso sea difícil en algunos países.

7.2. Ciclos en ecosistemas naturales

7.2.1. Acumulación y transferencias

Para describir el ciclo del K, Ca, Mg y Al es necesario determinar su contenido en los diferentes compartimentos del ecosistema (suelo, mantillo, vegetación) y determinar las transferencias con los residuos vegetales y el agua. La información disponible es sin embargo muy pequeña (20, 23).

De acuerdo con el Cuadro 7.2. las reservas de potasio en la vegetación generalmente no pasan de 1000 kg.ha^{-1} ; los ecosistemas del Darién, Panamá (29), de los llanos occidentales de Venezuela (32), y de Kabo en Surinam, (50), alcanzan valores más altos. Los datos del suelo mineral se refieren en parte al K total, en algunos casos solo se ha indicado el valor de K cambiante y así resulta difícil la interpretación correspondiente. Por ello, las relaciones vegetación/suelo siempre son mayores que 1,0; ello implica que en la mayor parte de los ecosistemas el potasio es un elemento limitante.

De los datos de transferencia se puede concluir que la tasa de deposición con las lluvias es siempre menor que la de escurrimiento foliar, ello implica que el agua en su pasaje por el ecosistema transfiere en parte el potasio de los tejidos foliares (Cuadro 7.1). Las pérdidas del ecosistema no han sido hasta ahora casi estudiadas.

En el Cuadro 4.2 se han presentado los valores de las reservas de K, Ca, Mg y Al en el ecosistema forestal montano de San Eusebio, Venezuela (15, 16, 31).

Cuadro 7.2. Reservas y transferencias de potasio en ecosistemas tropicales (según diferentes autores).

	FITOMASA		Reservas (kg.ha ⁻¹)			Total	Veget. suelo	Lluvia	Veget. lluvia (años)	Transferencias (kg.ha ⁻¹ .a ⁻¹)	Egreso	"Turn over"
	Viva	Muerta	Raíces	Manti- llo	Suelo mineral (cm)							
Ecosistemas montanos												
San Eusebio Venezuela	1322	28	147	59	180 (40)	414	1,80	2,6	508	690	66,1	2,2 4,3
Fassbender Grimm 16, 17, 31												
Edwards, Grubb 13, 14	1090	7	137	24	200 (25)	1458	6,69	--	--	--	--	--
Blue forest Jamaica 59, 60, 61	259	--	--	--	29 (45)	288	8,93	--	--	--	--	--
El Verde Pto. Rico 49	926	--	21	2	34 (30)	983	27,91	--	--	--	--	--
Ecosistemas de llanura												
Manaos Brasil 44, 45	434	5	62	3	18 (30)	522	28,0	--	--	--	13,0	--
Madalena Colombia 26, 27	277	--	--	3	118 (50)	399	2,35	--	--	--	17,0	--
Madras Depresión	389	--	--	32	176 (50)	597	2,39	--	--	--	29,0	--
Dardán Panamá 7	3492	--	80	20	118 (30)	3710	30,44	9,5	368	50	128,0	9,3
Premontano	2249	--	--	25	100 (30)	2442	23,42	--	237	--	91,0	--
Llanos Occid. Venezuela 32	1821	--	--	20	399 (50)	2240	4,61	--	--	--	--	--
San Carlos Venezuela 11erra Prima	318	--	46	8	125 (40)	497	2,98	13,3	--	19,9	9,3	6,1 24
Kabo Suriman	1516	--	--	43	66 (50)	1625	22,97	--	--	--	--	--
Kadé Ghana 30, 52	774	36	88	10	217 (30)	1125	4,18	17,5	44	237	--	278
Banco Itiweg Costa Marfil 7	600	--	--	--	160 (50)	--	--	5,5	110	170	81,0	255
Yapo Forest Malasia	350	--	--	--	115 (50)	465	3,04	--	64	82	26	11

7.2.2. Modelos de los ciclos

Ciclo del potasio en el ecosistema de San Carlos de Río Negro, Venezuela.

A manera de ejemplo se presenta en la Figura 7.1 el modelo de K para el ecosistema de San Carlos de Río Negro, Venezuela, según los datos de Jordan y Herrera (38, 39, 40, 41). Se trata del ecosistema de "tierra firme" el cual no es inundado y recibe una precipitación anual de 3600 mm. Del total de $496 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ se encuentran respectivamente 73; 2 y 25 % en la vegetación, mantillo y suelo mineral. El escurrimiento de tallos y hojas es bastante elevado ($19,9 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$), igualmente que la producción de residuos vegetales ($9,3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$), sin embargo las pérdidas por escurrimiento lateral del suelo solo alcanzan $5,1 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; así la mayor parte del potasio que llega al suelo es reabsorbido por el bosque.

Ciclos del potasio, calcio y magnesio en el ecosistema de San Eusebio, Venezuela.

Al utilizar el modelo básico del ciclo de los elementos químicos presentado para el N (Figura 5.2) y con los valores resumidos en los Cuadros 3.4; 4.2; 4.10; se pueden construir los modelos de otros elementos. Para los elementos nutritivos K, Ca y Mg se estudiaron las reservas en el suelo en forma cambiante; las reservas totales son desconocidas, y de menor interés (15, 16, 31).

La reserva de K en la vegetación alcanza un valor más alto que en el suelo, resultando así el elemento limitante de la estabilidad del ecosistema, especialmente al pensar en una utilización o destrucción de la vegetación; la sucesión natural forestal dependerá notablemente del K. Esta situación se agrava al encontrar que la relación entre la reserva ($1,469 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y el ingreso ($2,6 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) es muy elevada, necesitándose 565 años para su recuperación. En el "turnover" participa en forma notable el escurrimiento foliar. Los valores de ganancia y pérdida del ecosistema son casi comparables, resultando un estado estático ("steady state") del K en el ecosistema.

Las reservas de Ca y Mg en la vegetación alcanzan el 29 y 33 % del total del ecosistema respectivamente. La dinámica de estos elementos, especialmente su ingreso anual, asegura su ciclo tanto en el ecosistema actual como en fases de regeneración de la vegetación natural.

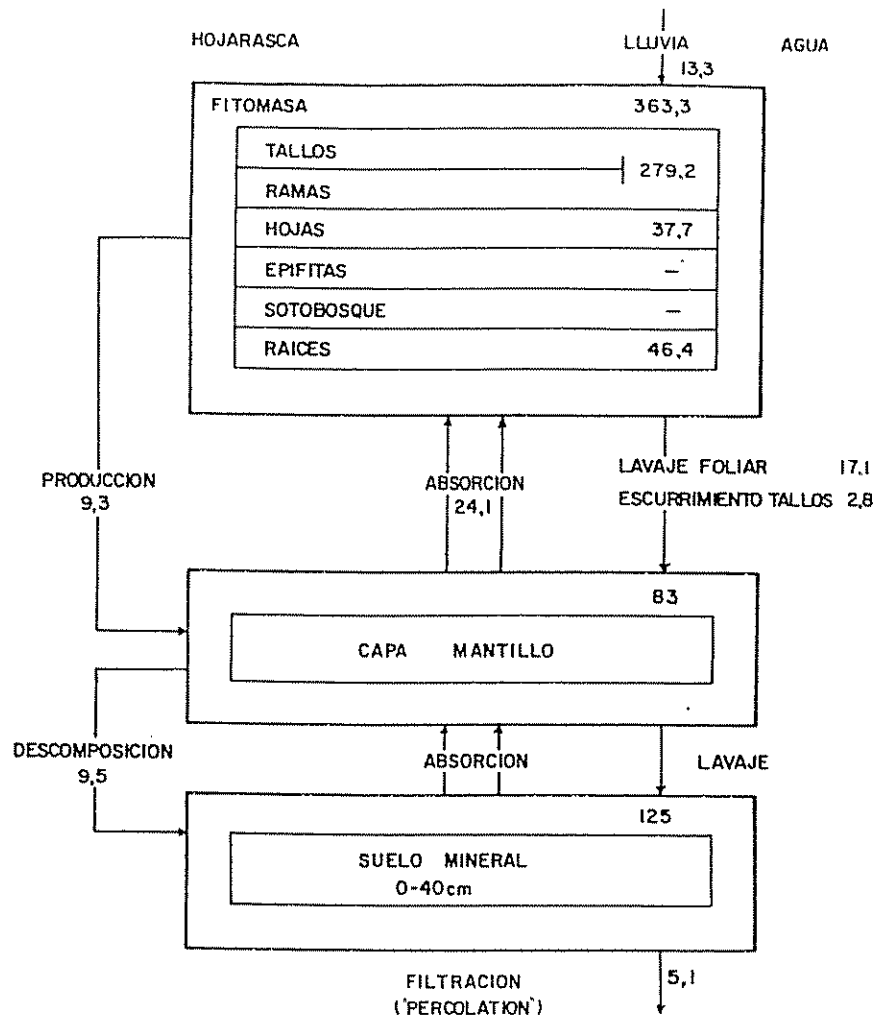


Figura 7.1. Ciclo del potasio en el ecosistema de Caatinga en San Carlos de Río Negro, Venezuela (Jordan y Herrera, 41) (dimensiones: reservas en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$).

Ciclo del aluminio en el ecosistema montano de San Eusebio, Venezuela.

Los valores para el modelo matemático de los elementos estudiados se pueden observar en el Cuadro 4.2. Aquí resulta de notable interés el modelo del aluminio, presentado igualmente por separado en la Figura 7.2 (16). Con $9250 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en 40 cm el Al

alcanza la mayor reserva (82%) de los elementos acumulados en el complejo de intercambio catiónico del suelo. Ello se debe, sin duda, a la fuerte acidez del suelo (pH entre 3,5 y 4,0 en toda la profundidad estudiada). Así, este elemento juega un papel importante dentro del ecosistema, lo cual implica un empobrecimiento de las bases y una estabilidad del complejo orgánico-mineral del suelo (enlaces entre Al y ácidos húmicos).

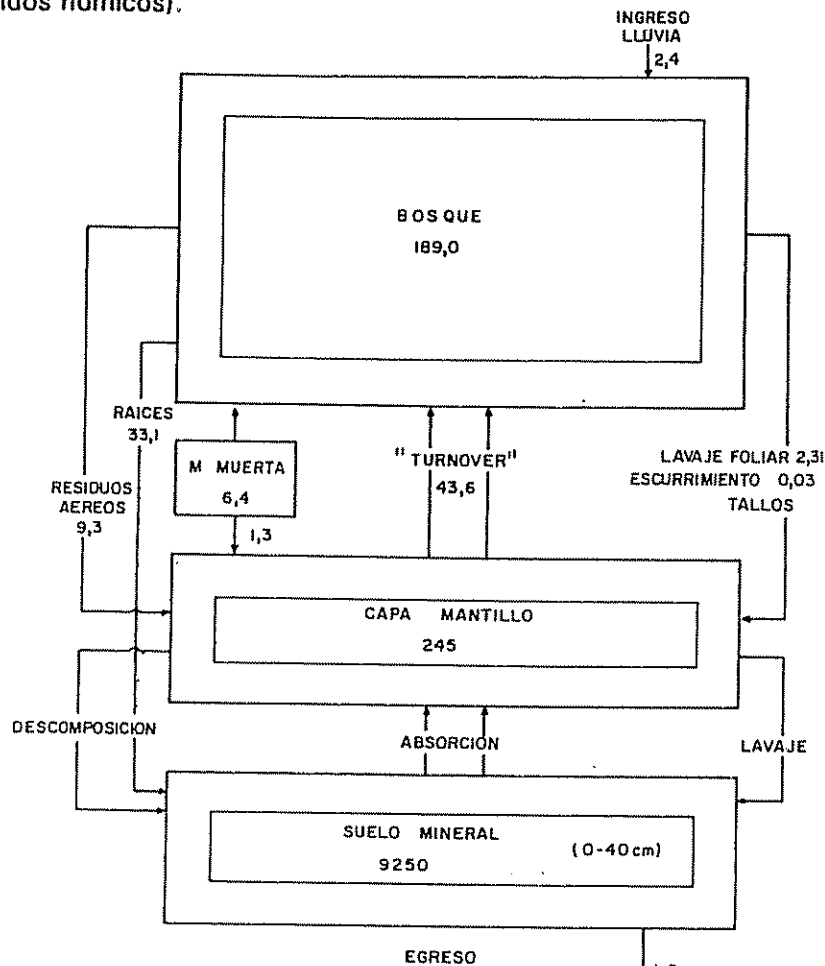


Figura 7.2. Modelo del ciclo del aluminio en el ecosistema forestal de San Eusebio, Venezuela (según Fassbender y Grimm, reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$).

El ciclo del Al es igualmente interesante desde el punto de vista de los procesos de transferencia de este elemento no nutritivo para las plantas. Las aguas de lluvia tienen una concentración promedio de

0,157 mg Al.l⁻¹ (Cuadro 3.3) alcanzándose un ingreso de 2,4 kg.ha⁻¹.a⁻¹, (Cuadro 3.4) como fuentes de origen se consideran la industria petroquímica y la erosión del suelo. Dentro del rodal, inclusive aumenta la concentración de Al a 0,19 mg.l⁻¹ y alcanza su mayor concentración después de pasar la capa de mantillo a 20 cm de profundidad del suelo (1,65 mg.l⁻¹). En 90 cm de profundidad se determinó una concentración de 0,18 mg.l, resultando así un egreso de 1 kg.ha⁻¹.a⁻¹ (Cuadro 3.4). Este comportamiento indica que el Al es absorbido en forma pasiva por las plantas, es excretado parcialmente por las hojas, participa dentro de los procesos de descomposición de los residuos vegetales, es móvil en el suelo y retenido específicamente en el subsuelo, seguramente en el complejo de intercambio catiónico o asociado a algún quelato. Estos aspectos son de gran importancia para estudios futuros del funcionamiento de los ecosistemas en suelos ácidos.

7.3. Ciclos en agroecosistemas

7.3.1. Efecto de la tumba y quema de bosques sobre el K, Ca y Mg

Los detalles correspondientes han sido tratados en el Capítulo 4.3.1. La tala y quema de los bosques implica una oxidación del K, Ca y Mg y la formación de los óxidos correspondientes. Así entonces aumenta el pH y los contenidos de bases cambiables. De ello resulta una disponibilidad adecuada de K, Ca y Mg en la fertilidad de los suelos; con la filtración del agua y los elementos disueltos, se produce, sin embargo, una pérdida muy rápida de la fertilidad (20, 23, 52).

7.3.2. Necesidades de los cultivos

En casi todos los libros modernos de agronomía tropical y especialmente de ciencias del suelo se ha reconocido la importancia de K, Ca y Mg para los cultivos y con ello para los agroecosistemas (8, 12, 20, 23, 53).

En el Cuadro 4.13 se han presentado los datos de absorción de K, Ca y Mg de los cultivos tropicales más importantes recopilados por Sánchez (53). La remoción de K muchas veces es comparable a la de nitrógeno. Las necesidades de Ca y Mg de los cultivos son menores que las de K.

7.3.3. Ciclos en sistemas de plantaciones forestales

En las plantaciones, el ciclo de K, Ca y Mg, paulatinamente toma un carácter cerrado. A través de la meteorización parental se liberan cantidades apreciables que aparecen en forma de ion en la solución del suelo, donde se establece un equilibrio químico con el complejo de intercambio. Al desarrollar el rodal, se acumulan estos elementos en las plantas y a través de la producción de la hojarasca y su descomposición en la capa del mantillo se establece un ciclo interno suelo-bosque, muchas veces estable. A través de filtración se pueden perder estos elementos del suelo y aparecen en el agua freática. En el caso de monocultivos forestales es conveniente por lo menos reponer las cantidades extraídas con una fertilización de compensación.

Casi no existen estudios completos sobre los ciclos de K, Ca y Mg en plantaciones forestales tropicales y subtropicales. De acuerdo con datos de Lundgren (47) una rotación de Pinus patula de 30 años remueve del sitio $696 \text{ kg K.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$ (Cuadro 7.3.); de la demanda anual de 78 kg K.ha^{-1} , casi la mitad ($35 \text{ kg K.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$) vuelven al suelo en forma de hojarasca. En el caso de Cupressus lusitanica la demanda es de $74 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$; de los cuales 30 retornan al suelo; 36 se acumulan en la biomasa y $8 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{a}^{-1}$ se remueven con los raleos. A los 30 años se extrajo un total de 724 kg K.ha^{-1} del suelo.

Los valores respectivos para Ca y Mg se pueden observar, igualmente en el Cuadro 7.3. Generalmente las necesidades de Ca son comparables a las de K. La extracción y acumulación de Mg en los rodales es más pequeña.

Según Egunjobi y Bada (15) en una plantación de Pinus caribaea de 10 años de edad se acumulan un total de 375 kg K.ha^{-1} , de los cuales 152 se encuentran en las acículas y 105 en las ramas y tallos, el resto aparece en las raíces y en la capa de mantillo.

La extracción total de K, Ca y Mg en una plantación de Agathis dammara de 40 años en Java, Indonesia alcanzó 1654, 3316 y 706 kg.ha^{-1} respectivamente (Cuadro 4.19; 10).

Cuadro 7.3. Balance de K, Ca y Mg en rodales de Pinus patula y Cupressus lusitanica en Tanzania, durante una rotación de 30 años ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$); según Lundgren, 47).

	<u>Pinus patula</u>		<u>Cupressus lusitanica</u>	
	K	Ca	Mg	Mg
1. Demanda anual promedio	78	109	32	74
2. Retorno anual al suelo	35	63	17	30
3. Remoción por raleos/año	8	10	3	8
4. Retenido en la biomasa/año	35	36	12	36
5. Inventario total a la edad de rotación	1042	1075	346	1090
6. Remoción en las trozas por corta total	453	468	178	472
7. Restos en el suelo por corta total	589	607	168	618
8. Remoción total del sitio	696	753	277	724
9. Remoción promedio anual	23	25	9	24
				1818
				183
				781
				68
				1037
				11
				104
				3

7.4. Ciclos en sistemas de producción agroforestales

7.4.1. Aspectos generales

Como fue indicado anteriormente, las bases generales del modelaje de sistemas (Capítulos 1.3.3.; 2.2.4 y 2.6) son aplicables para describir los ciclos de K, Ca y Mg en sistemas de producción agroforestales. La base es el ciclo de la materia orgánica y la determinación de K, Ca y Mg en todos los materiales de acumulación y transferencia.

La información disponible sobre los ciclos de K, Ca y Mg en sistemas agroforestales es aún muy escasa. Existen ejemplos basados en resultados obtenidos en sistemas de café y cacao con árboles de sombra (1, 2, 3, 4, 5, 6, 18, 19, 21, 22, 24, 25, 33, 34, 36, 37, 43, 46, 52, 58, 62) que serán descritos en los acápites subsiguientes.

7.4.2. Sistemas de café con árboles de sombra

· Ciclo del potasio

Los ciclos del K, Ca y Mg se pueden ilustrar con los estudios realizados en el Experimento Central del CATIE en Turrialba, Costa Rica en los sistemas de café (Coffea arabica) bajo sombra de laurel (Cordia alliodora) y de poró (Erythrina poeppigiana) a la edad de cinco años (ver Capítulos 3.4.3; 4.4.4 y 5.4.2) (1, 4, 19, 21, 22, 36).

En la Figura 7.3 se presentan los modelos del ciclo de K. Para ellos se han considerado los siguientes valores de potasio:

- Acumulación en la biomasa de café y poró a los 4,5 años, de laurel a los cinco años y en el suelo en forma de K-cambiable al inicio del experimento (1977).
- Producción de residuos vegetales naturales y de podas durante el quinto año experimental.
- Cosechas de café en el quinto año experimental.
- Aplicación de fertilizantes promedio del experimento, ingreso con el agua de lluvias para la región de Turrialba (35).
- Extracción del suelo para compensar las necesidades de crecimiento y producción de los sistemas.

En el Cuadro 5.10 se han presentado las concentraciones de K en los diferentes órganos de las especies de los sistemas y en la capa de mantillo. Se observa que los árboles de sombra, especialmente el poró, presentan mayores contenidos de K que los compartimentos de la biomasa del café; igualmente el café bajo el poró presenta en todos los órganos valores más altos que bajo el laurel. Los valores en las raíces no fueron diferenciados entre especies. La capa de mantillo tiene un valor promedio comparable a una mezcla de las hojas que paulatinamente caen al suelo.

La acumulación de potasio en los sistemas de café con laurel y de café con poró se pueden observar en la Figura 7.3 y en el Cuadro 7.4.

Cuadro 7.4. Reservas de K acumuladas en la biomasa y el suelo de los sistemas de café con laurel y café con poró ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$; según Alpizar, 1; Alpizar *et al.*, 2; Fassbender *et al.*, 19, 21, 22).

	Café con laurel		Café con poró	
Hojas	4,1	51,7	19,4	74,5
Ramas	10,1	37,2	89,5	109,8
Tallos	16,5	109,4	15,2	29,4
Raíces finas		27,8		18,5
Mantillo		14,3		17,1
Suelo (0-45 cm)		687,0		630,0
TOTAL		957,0		1003,0

El K acumulado en la vegetación en los sistemas estudiados es muy diferente; en la asociación café con poró alcanzó $356 \text{ kg K} \cdot \text{ha}^{-1}$, en café con laurel $256 \text{ kg K} \cdot \text{ha}^{-1}$. En esta asociación el K acumulado en las ramas y tallos del laurel ($146,6 \text{ kg K} \cdot \text{ha}^{-1}$) corresponde al 57% del total. Igualmente, el K en los granos alcanzó valores muy diferentes, $57,6 \text{ kg K} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ para café con poró y $18,7 \text{ kg K} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ para café con laurel.

Las cantidades porcentuales de K encontradas en el suelo (para las asociaciones con poró, 63% y con laurel 72% del total) son pequeñas en comparación con otros elementos nutritivos. Esto se debe

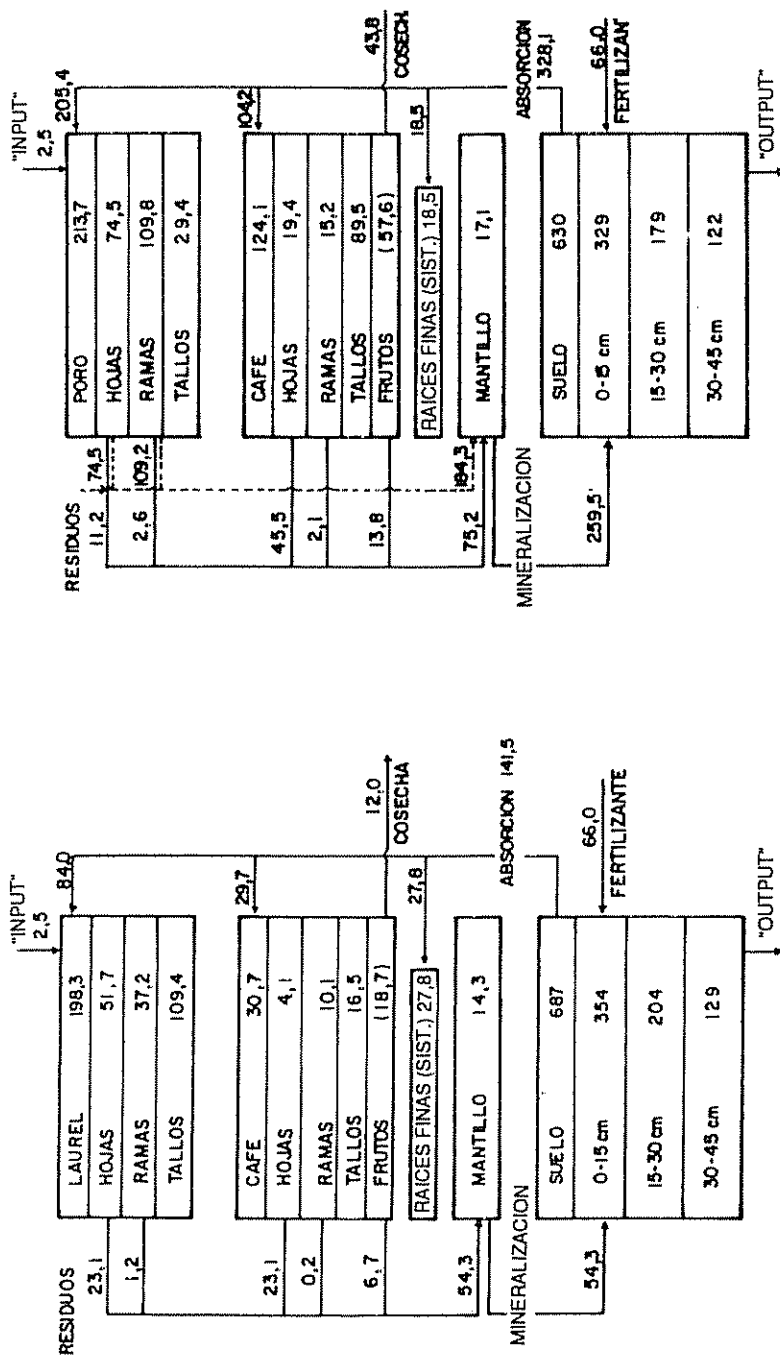


Figura 7.3. Modelos del ciclo del potasio de los sistemas agroforestales de café con laurel y café con poró en Turrialba, Costa Rica (según Alpizar et al., 1; Fassbender et al., 19; Heuvelink et al., 36; reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$).

especialmente a la determinación del K en su forma cambiante. El valor del K-total es desconocido, como la mayor parte corresponde al K estructural, su cantidad tiene poca importancia.

La dinámica de K se refleja en su exportación con las cosechas y la transferencia con los residuos vegetales. En la Figura 7.3. se han presentado los valores de K en la cosecha entre paréntesis indicando que estos valores son adicionales para un año. La exportación de K bajo el sistema café/poró es más elevada que bajo la sombra de laurel. Una parte del K de los frutos cae al suelo como residuo vegetal, ello se debe a la cosecha irregular del café.

La translocación de K con los residuos vegetales, especialmente a través de la poda del poró es considerable. Durante un año experimental se observaron los siguientes valores: café con laurel $54,3 \text{ kg K}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, café con poró $259,5 \text{ kg K}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, de los cuales $184,3$ corresponden a las podas del poró.

La dinámica del K asociada con los residuos de la biomasa aérea, se expresa con los cocientes de circulación, expresados en porcentajes y calculados de la misma forma que para la materia orgánica, de la siguiente manera:

Indice de circulación del K (%)

Sistema café con laurel	24
Laurel	12
Café	97
Sistema café con poró	77
Poró	93
Café	50

La absorción del K por las plantas se puede resumir con los siguientes datos ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$):

	Café con laurel		Café con poró	
Biomasa aérea	29,7	84,0	104,2	205,4
Raíces		27,8		18,5
TOTAL		141,5		328,1

Se ratifica una vez más que la cantidad absorbida de K anualmente por el sistema café con poró es más elevada que la de la asociación café con laurel. La actividad nutritiva del primer sistema es mucho más elevada que la del segundo. La concentración de K encontrada en los frutos (1,6% en café + laurel y 1,5% en café + poró) es más baja que la encontrada por otros autores en Costa Rica y en otros países.

El balance anual (quinto año experimental) de K del suelo se puede resumir como sigue ($\text{kg K}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$):

	Café con laurel	Café con poró
<u>Ganancias</u>		
Fertilizante	66,0	66,0
Agua de lluvia	2,5	2,5
Residuos vegetales	54,3	259,4
TOTAL	122,8	328,0
<u>Pérdidas</u>		
Absorción por planta	141,5	328,1
Filtración	desc.	desc.

Aquí nuevamente se observa una diferencia importante entre los sistemas en estudio. Las ganancias de K en el sistema café con poró superan las tasas de absorción de K del suelo. Sin embargo, las cantidades notables de K en los residuos vegetales provienen originalmente del suelo y así se está produciendo, a largo plazo, una extracción notable de K del suelo. En el caso del sistema café con laurel las tasas de deposición de K en el suelo son menores que las de absorción. La filtración del K con el agua freática es desconocida dada la movilidad de este elemento se postula que se está perdiendo K.

Con las cosechas de café (1979-1984) y el raleo de madera se han extraído en total:

	Café con laurel	Café con poró
$\text{kg K}\cdot\text{ha}^{-1}$	174	187

La suma total de la remoción de K cambiante a partir del suelo durante la época experimental (1979-1984) resulta así de:

	Café con laurel	Café con poró
kg K.ha ⁻¹	445	560

Así tenemos que el agotamiento de las reservas del suelo es muy notable equivaliendo al 65 y 89% de las reservas bajo sombra de laurel y poró respectivamente. Sin embargo, es conveniente indicar que las raíces alcanzan profundidades mayores de 45 cm, donde pueden extraer igualmente cantidades importantes de K. Por otro lado la fertilización (66 kg K.ha⁻¹) es elevada y puede compensar su remoción por las plantas.

La mayor limitación de los estudios es la falta de información sobre la pérdida de elementos nutritivos con el agua de lixiviación. Aparentemente el potasio es el elemento limitante para el desarrollo y productividad de los sistemas agroforestales en estudio.

· Ciclos de calcio y magnesio

Los resultados obtenidos en el inventario de Ca y Mg en los sistemas agroforestales de café bajo laurel y café bajo poró han sido resumidos en el Cuadro 7.5. Igualmente en el mismo Cuadro se presentan los valores de las cosechas, transferencias con los residuos vegetales y absorción de Ca y Mg de los sistemas en estudio (91, 19, 22, 36, 91). Utilizando el esquema de la Figura 7.3 se puede establecer el modelo correspondiente para los elementos y sistemas en estudio.

Los sistemas exhiben una acumulación de reservas de Ca en la biomasa aérea de 259 y 340 kg.ha⁻¹ con 71 y 30 kg.ha⁻¹ en las raíces, y 103 y 85 kg.ha⁻¹ en el mantillo para el sistema con laurel y poró, respectivamente. Para el Mg se tiene una acumulación de reservas en la biomasa aérea de 74,4 y 76,9 kg.ha⁻¹, con 17,5 y 10,0 kg.ha⁻¹ en las raíces y 19 y 14 kg.ha⁻¹ en el mantillo. Se desconoce el ritmo de acumulación de reservas a través del tiempo.

En cuanto a la relación café/laurel: café/poró, con respecto a las reservas de la biomasa aérea y radical se tiene que es del orden 1:1,18 en el caso del Ca y de 1:1 para el Mg; a su vez, las reservas acumuladas de Ca en el cafeto con poró son el doble de las reservas acumuladas en el cafeto con laurel. En el caso del Mg se tiene que el cafeto con poró supera en 2,8 veces las reservas del cafeto con laurel.

Cuadro 7.5. Acumulación ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y transferencias ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) de Ca y Mg en los sistemas agroforestales de café con laurel y café con poró (según Alpizar *et al.*, 1; Fassbender *et al.*, 19, 22; Heuvelink *et al.*, 36).

RESERVAS	Ca			Mg			
	Café / laurel	Café / poró	Café / poró	Café / laurel	Café / poró	Café / poró	
Hojas	20,0	39,1	33,4	65,5	1,8	8,1	22,0
Ramas	21,9	14,5	39,6	55,6	1,7	4,5	20,8
Tallos	35,4	128,5	82,5	63,5	5,2	12,2	9,3
Raíces	70,5		30,4		17,5		10,0
Mantillo	103,1		85,1		19,2		14,5
Suelo	2783,0		2835,0		587,0		573,0
TOTAL	3216,0		3291,0		700,0		674,0
TRANSFERENCIAS							
Cosechas	7,1		22,2		2,0		5,6
Residuos vegetales							
Naturales	109,9		121,6		37,7		33,1
Podas							42,1
Absorción	183,0		294,7		52,3		81,6
Fertilización							
Lluvia	1,4		1,4		1,5		1,5

Otra relación importante es la que se presenta entre el cafeto y el árbol. Así se tiene que para el Ca la relación de reservas cafeto: laurel es del orden 1:2,3; mientras que para el sistema con poró tal relación es del orden 1:1,2. Para el Mg la relación de reservas cafeto: laurel es del orden 1:7,7 y con poró la relación es del 1:2,1. Siendo el Mg un elemento de importancia en la nutrición del cafeto, es de esperar que una relación tan desproporcionada como la que se observa en el sistema con laurel pueda ser un factor perturbador en la producción del cafeto.

Los datos ofrecen índices superiores de circulación para Ca y Mg en el sistema con poró, si bien la superioridad en el caso del Ca no es tan marcada como la observada en los demás elementos. Por su parte, en el caso del Ca, los cafetos presentan índices similares, contrario a lo que sucede para el N, P y K, donde los cafetos bajo poró mostraron índices superiores. Por otro lado, en el caso del Mg los cafetos muestran índices bastante altos en los dos sistemas, debido probablemente a que no se puede dar una acumulación del Mg en las hojas del cafeto poco antes de su absorción. Algo similar se observó para el K.

Las cantidades absorbidas de Ca son equiparables a las de K. Como es de esperar, la absorción de Mg es menor que la de K y Ca. Nuevamente se ratifica que el sistema café con poró presenta una mayor absorción de estos elementos que la asociación café con laurel.

Al considerar el balance de Ca y Mg en el suelo es necesario indicar que estos elementos no se están aplicando como material de enmienda.

Las pérdidas de Ca en ambos sistemas son más altas que las ganancias, por lo tanto se está produciendo una pérdida constante de este elemento que es acentuada por la lixiviación. En el caso de Mg ambas asociaciones tienen un balance negativo.

· Balance de cationes en el suelo

En los acápite anteriores se ha indicado que en los sistemas agroforestales se está produciendo una pérdida continua de K, Ca y Mg. Ello ha sido evidenciado con el análisis de muestras de suelo, formadas al inicio del experimento (1977) y después de cuatro años (1981) (1, 22). Se han analizado la acidez cambiante (H + Al) y las bases cambiantes (K, Ca, Mg).

Una posible explicación de las pérdidas del K así como también de Ca y Mg es la acidificación progresiva de los suelos por el proceso de mineralización de los residuos vegetales. A través de este proceso se libera NH_4^+ que es nitrificado obteniéndose así por último NO_3^- , ambos iones aparecen en la solución del suelo y participan en los procesos de intercambio. Igualmente a través de la mineralización de los residuos se produce SO_4^{2-} , como un factor acidificante muy fuerte. De ello resulta un aumento del H y Al cambiabile (Figura 7.4.). De las interacciones entre todos los elementos resultan por último las pérdidas notables de K, Ca y Mg (Figura 7.4.). Su cuantificación a largo plazo será conveniente, en forma de instalaciones de observación permanente (22).

7.4.3. Sistemas de cacao con árboles de sombra

- Ciclo del potasio

En la literatura se ha encontrado información aislada sobre el ciclo del potasio en sistemas de cacao (Theobroma cacao) asociado con árboles de sombra (2, 4, 9, 23, 24, 37, 33, 34, 55). Con base en los datos obtenidos en el Experimento Central del CATIE en Turrialba, Costa Rica, se han preparado los modelos del ciclo de potasio para los sistemas cacao con laurel (Cordia alliodora) y cacao con poró (Erythrina poeppigiana) a la edad de cinco años (4, 9, 23, 37). Posteriormente se han profundizado los estudios para obtener valores a la edad de seis a 10 años de los sistemas. A manera de ejemplo se presenta en la Figura 7.4. el ciclo quinquenal de K (1983-1987) para el sistema de laurel/cacao; en detalle se han utilizado los siguientes valores (ver Cuadros 7.6 y 7.7) promedio de los valores a cinco (1983) y 10 años (1987):

- Reservas de K cambiabile del suelo del experimento.
- Acumulación de K en la biomasa como promedio de los valores a los cinco y 10 años de edad de los sistemas (Alpizar et al, Fassbender et al, 25).
- Cosecha de cacao durante cinco años (1983-1987) y de crecimiento del laurel (Fassbender et al, 25).
- Producción de residuos vegetales naturales durante cinco años experimentales (nov. 1983 a oct. 1987) y de podas de dos años (1985-1987) (Imbach et al, 34).

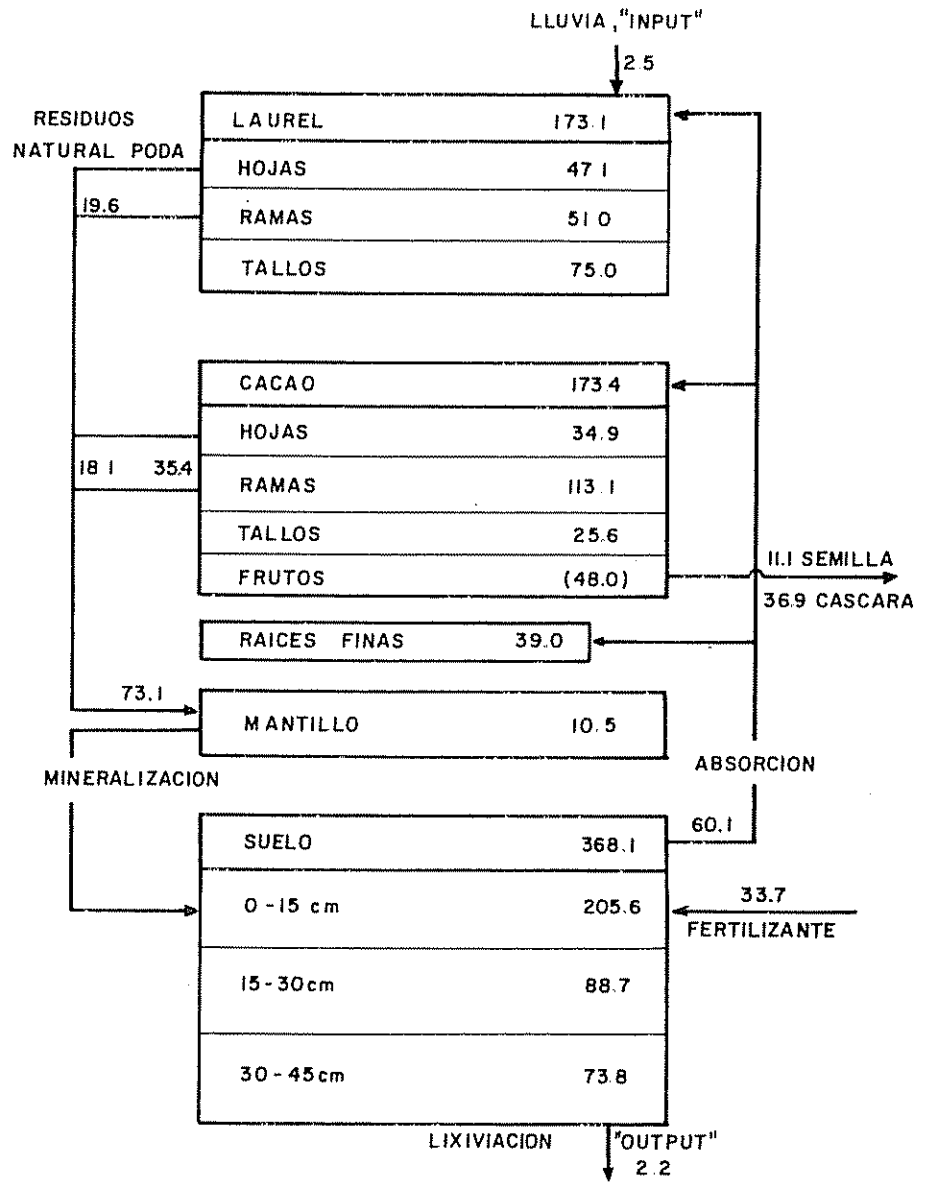


Figura 7.4. Ciclo del potasio (1983-1987) para el sistema de cacao/con laurel en CATIE, Costa Rica (Reservas $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; transferencias $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; en base a valores de Alpizar *et al.*, 2; Fassbender *et al.*, 24, 25; Imbach *et al.*, 34 y valores provisionales aún no publicados).

- Deposición con las aguas de lluvia medida en la cercanía del experimento durante dos años (35).
- Extracción de P del suelo para compensar la remoción con las cosechas, renovación anual de la biomasa.

Los valores de la concentración de K en los diferentes órganos vegetales han sido presentados anteriormente (Cuadro 5.13). Tal como se esperaba, el orden del contenido de K es hojas > ramas > tallos.

En el caso de las hojas los valores para ambos sistemas en estudio no son comparables, ya que se observa que los valores para poró y laurel (1,30 y 2,28%) son más elevados que los de cacao (0,56 y 1,01 %). El caso similar se observa para los tallos en los cuales el cacao presenta valores menores que los árboles de sombra.

Con base en los valores de la biomasa de los diferentes compartimentos (Cuadro 4.26) y su contenido de K (Cuadro 5.13) se han calculado las reservas de P en los sistemas en estudio.

Los valores de K en la vegetación a los 10 años experimentales presentan tendencias definidas y muy diferenciadas entre los sistemas en estudio. Los árboles de sombra presentaron reservas de K diferenciadas, 102 y 283 kg K.ha⁻¹ para laurel y poró respectivamente. La mayor acumulación se presenta en las ramas del poró y tallos del laurel (Cuadro 7.6) presenta en total un valor más alto, el cacao/poró (520 kg K.ha⁻¹) que el cacao/laurel (419 kg.ha⁻¹).

La acumulación de K en la biomasa es elevada en comparación con el K- total de los sistemas en estudio. Aquí es necesario indicar que las reservas del suelo son de K cambiante (método NH₄Cl).

En el modelo de la Figura 7.4 se presenta, entre paréntesis, el valor de K de la biomasa de los frutos, indicando que se trata de una biomasa dinámica que finalmente sale del sistema. Al evaluar esta exportación se diferencian las semillas y el pericarpio (cáscara) de los frutos (Cuadro 5.17). La remoción de K con las cáscaras es más elevada que con las semillas. Comparando la extracción con las cosechas, la biomasa total resulta para el K un índice elevado de exportación (Figura 7.4):

	Cacao con laurel	Cacao con poró
Biomasa (kg.ha ⁻¹)	418,6	520,4
Cosecha (kg.ha ⁻¹ .a ⁻¹)	48,0	39,4
% Exportación	11,5	7,6

Cuadro 7.6. Valores de las reservas de potasio en sistemas cacao/laurel y cacao/poró a los cinco y 10 años ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; Alpizar *et al.*, 2; Fassbender *et al.*, 25; valores provisionales).

	Cacao/laurel		Cacao/poró	
	5 años	10 años*	5 años	10 años*
BIOMASA				
Cultivo	98,8	248,0	49,1	145,2
Arbol	243,4	102,8	122,2	282,9
Raíces	21,4	56,6	17,7	27,0
Mantillo	9,8	11,2	12,0	15,3
Total	373,4	418,6	201,0	520,4
Suelo				
Inicial (1977)	577		713	
5 años (1982)	386		474	
10 años (1987)*	350		389	

Del Cuadro 5.15 se desprende que el contenido de K en los residuos vegetales es bastante diferenciado entre las especies involucradas en los sistemas agroforestales. En función de las cantidades de hojarasca producida se depositan sobre el suelo $73,1$ y $177,3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ bajo cacao/laurel y cacao/poró respectivamente (Cuadro 7.7). La diferenciación se debe especialmente a la poda del poró. El índice de reciclaje resultante (residuos: biomasa) es de 17 y 34 % para cacao/laurel y cacao/poró respectivamente.

Al comparar los valores de K de las cosechas con el reciclaje con los residuos vegetales se obtienen los siguientes valores ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; Figura 7.4; Cuadros 7.6 y 7.7):

	Cacao con laurel	Cacao con poró
Cosechas	48,0	39,4
Reciclaje	73,1	177,3
Reciclaje: cosecha	1,5	4,5

Cuadro 7.7. Transferencias de potasio en sistemas de cacao/laurel y cacao/poró ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; quinquenio seis a 10 años) (según Fassbender *et al*, 25; Imbach *et al*, 34; valores provisionales aún no publicados).

	Cacao/laurel		Cacao/poró	
"INPUTS"				
Lluvia	2,5		2,5	
Fertilizantes*	34,2		34,2	
TOTAL	36,7		36,7	
"OUTPUTS"				
Cosechas	11,1		11,1	
Cáscaras	36,9		28,3	
Semillas	48,0		39,4	
Lixiviación	2,2		1,8	
TOTAL	50,2		41,2	
RESIDUOS				
Naturales	18,1	19,6	11,4	14,4
Podas	35,4	--,-	22,7	128,8
Subtotal	53,5	19,6	34,1	143,2
TOTAL		73,1		177,3
ABSORCION	60,1		103,3	

Así el reciclaje sobrepasa la extracción por cosechas. Las ganancias o pérdidas de K en los sistemas con el agua de lluvia o agua freática son pequeñas en comparación con los otros parámetros en estudio.

En la Figura 7.5 se han presentado, a manera de ejemplo, detalles de la disminución del K cambiante en el suelo del sistema cacao/poró. Entre el inicio del experimento ($1977, 713 \text{ kg K}\cdot\text{ha}^{-1}$) y los 10 años experimentales ($1987, 324 \text{ kg K}\cdot\text{ha}^{-1}$) ha disminuido el K en $324 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Ello se puede explicar con base en un balance total del sistema, para ello se pueden considerar en detalle los siguientes valores ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 10 \text{ a}^{-1}$):

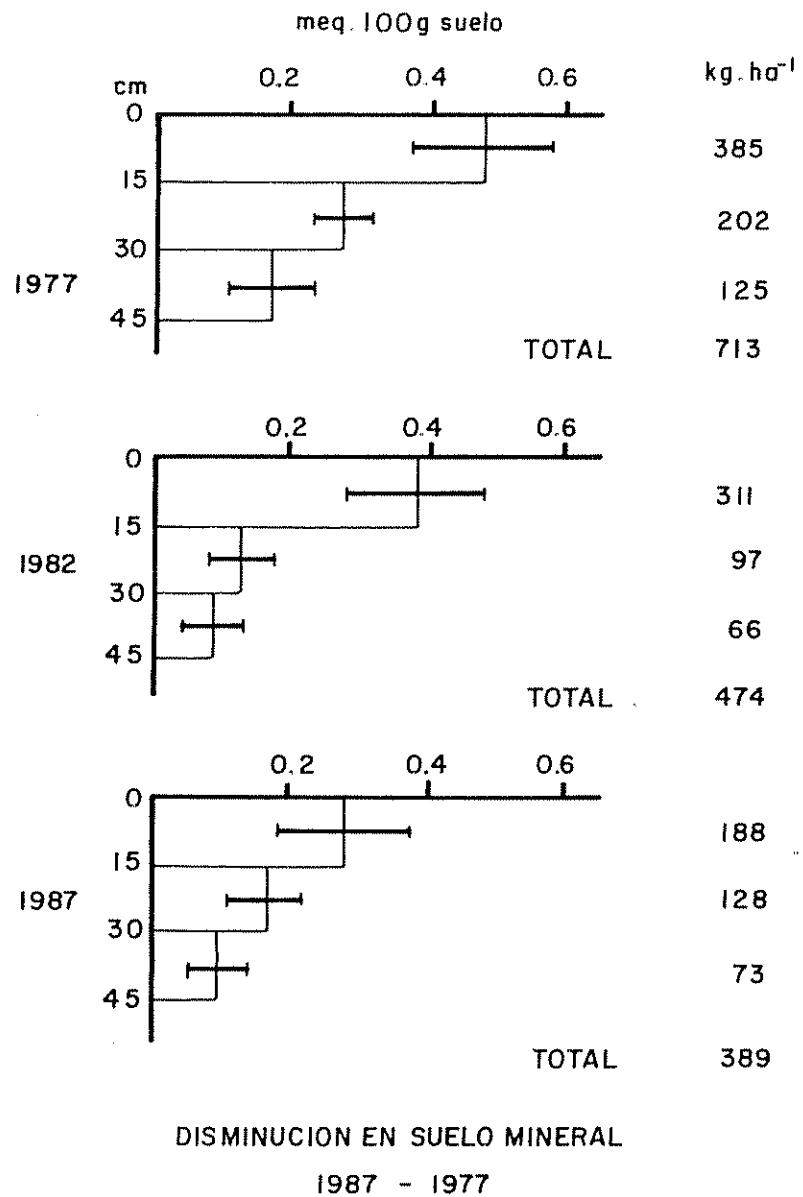


Figura 7.5. Cambios del potasio cambiante en el suelo bajo sistema cacao/poró en 10 años experimentales (1977-1987) (meq.100g⁻¹, kg.ha⁻¹, valores provisionales aún no publicados).

Ganancias

Fertilizante	356	
Lluvia	25	318

Pérdidas

Absorción		
Cultivo	195,2	
Arbol	282,9	
Raíces	27,0	
Mantillo	15,3	
Total	520,4	
Cosechas		
0-5 años	91,5	
6-10 años	197,0	
Total	288,5	
Lixiviación	22	831

La diferencia entre ambos balances se puede explicar por los errores en las diferentes determinaciones y por la liberación de K de las fracciones poco intercambiables de las arcillas del suelo (20).

· Ciclos del calcio y magnesio

Los resultados obtenidos en el inventario de Ca y Mg en los sistemas agroforestales de cacao/laurel y cacao/poró a la edad de cinco (Alpizar *et al*, 2) y de 10 años (datos provisionales han sido resumidos en el Cuadro 7.8).

La acumulación de elementos básicos sigue el orden $Ca > K > Mg$. Se constata que las reservas de Ca y Mg del suelo en forma cambiante sobrepasan a las acumuladas en la vegetación. Por tanto, no se ha producido su extracción exhaustiva como en el caso del potasio.

Las transferencias con las ganancias y pérdidas del sistema se pueden observar en el Cuadro 7.9. La dinámica de estos elementos se

Cuadro 7.8. Reservas de calcio y magnesio en sistemas cacao/laurel y cacao/poró a los cinco y 10 años (kg.ha⁻¹; Alpizar et al., 2; valores provisionales*).

	Cacao/laurel		Cacao/poró	
	5 años	10 años*	5 años	10 años*
CALCIO				
Biomasa				
Cultivo	99,7	230,8	95,2	240,9
Arbol	208,4	181,3	151,4	56,9
Raíces	44,4	52,4	14,3	24,3
Mantillo	84,5	247,7	83,3	187,8
TOTAL	437,0	712,2	433,5	509,9
Suelo (0-45 cm)				
Inicial	2410		3082	
5 años	1810		2131	
10 años*	2137		2848	
MAGNESIO				
Biomasa				
Cultivo	41,8	184,4	23,6	174,3
Arbol	80,5	95,4	77,4	78,2
Raíces	13,8	43,3	4,7	17,5
Mantillo	21,3	106,3	12,7	73,8
TOTAL	160,4	429,4	118,4	343,8
Suelo (0-45 cm)				
Inicial	551		651	
5 años	619		640	
10 años*	681		705	

7.4.4. Sistemas de praderas bajo árboles de sombra

Ciclo del potasio de pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*) bajo laurel (*Cordia alliodora*) y poró (*Erythrina poeppigiana*).

Los aspectos generales sobre este sistema, estudiado en el Experimento Central del CATIE, Turrialba, Costa Rica, han sido descritos anteriormente (ver Capítulo 3.4.3; 4.4.4; 5.4.5). El estudio de

los ciclos de los elementos nutritivos implica por un lado su determinación en los diferentes compartimentos del sistema y multiplicándolos con las reservas de materia seca se obtienen las reservas nutritivas acumuladas; por otro lado es necesario conocer sus transferencias las cuales se calculan igualmente multiplicando la concentración y la masa de materia (residuos, cosechas, agua, etc.).

De acuerdo con Alpizar (2) las reservas acumuladas en la vegetación y en el suelo se resumen de la siguiente manera ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$):

	Pasto estrella bajo laurel	Pasto estrella bajo poró
Biomasa en pie	366,6	126,0
Raíces finas	20,6	11,5
Capa mantillo	7,2	6,5
Suma	394,4	144,0
Suelo (0-45 cm)	1312,0	1186,0
Total del sistema	1706,0	1330,0

Tal como fue encontrado en otros sistemas agroforestales (café y cacao asociados con laurel y poró, Capítulo 6.4.2 y 6.4.3) la acumulación de K en la vegetación es paulatina equivaliendo a 21 y 11% del total bajo laurel y poró respectivamente. Las mayores reservas se encuentran aún en los suelos; las diferencias entre ellos pueden ser explicables por el manejo anterior al inicio del experimento.

En el Cuadro 5.21 se han resumido los resultados del análisis químico de los elementos nutritivos en el pasto estrella. En función de la producción y del contenido de K se pueden calcular los siguientes valores de exportación de N del sistema ($\text{kg} \cdot \text{ha} \cdot 4\text{a}^{-1}$):

	Materia seca $\text{t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 4\text{a}^{-1}$	Contenido P $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$	Exportación $\text{kg K} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot 4\text{a}^{-1}$
Pasto sólo	67,7	10,2	690,5
Pasto bajo laurel	46,9	13,2	619,1
Pasto bajo poró	72,9	10,0	729,0

Cuadro 7.9. Transferencia de calcio y magnesio en sistemas cacao/laurel y cacao/poró en el quinquenio de seis a 10 años de edad (1983-1987) (valores provisionales; $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)

	Cacao/laurel		Cacao/poró	
	Ca	Mg	Ca	Mg
"INPUTS"				
Lluvia	1,4	1,5	1,4	1,5
Fertilizante	-	14,7	-	14,7
"OUTPUTS"				
Cosecha				
Cáscara	2,7	3,7	8,6	3,2
Semilla	1,3	3,5	1,4	3,3
Total	9,0	7,2	10,0	6,5
Lixiviación	5,4	6,5	24,6	21,4
RESIDUOS				
Naturales	152,1	69,5	196,5	77,5
Podas	42,0	14,0	184,1	54,2
Total	194,1	83,5	380,6	131,7
ABSORCION	64,0	61,0	25,3	51,6

Las cantidades de K extraídas por el pasto de las tres asociaciones (con y sin sombra) son más o menos comparables (619 a 729 $\text{kg K}\cdot\text{ha}^{-1}$ en cuatro años). Como se trata de un pasto de corte, la extracción implica una exportación de este elemento.

Comparando la acumulación en la biomasa de los árboles y la exportación con el pasto se concluye que la especie pastoril extrae del suelo cantidades notables de K, utilizando gran parte de las reservas disponibles, evidentemente. La fertilización de 18,2 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ compensa parte de estas pérdidas.

La remoción anual de K del pasto estrella se encuentra dentro del ámbito o margen encontrado para otros pastos de corte (Cuadro 4.13). De acuerdo con los resultados obtenidos por Rodríguez (51), la extracción de K de "king-grass" bajo sombra de poró es comparable ($782 \text{ kg K}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 2\text{a}^{-1}$) a la del pasto estrella ($795 \text{ kg K}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot 2\text{a}^{-1}$).

Un aspecto limitante para la interpretación de los resultados exhaustivos de K del suelo y de su reciclaje en el sistema silvopastoril, es la falta de la determinación de la biomasa radicular y su fenología. El crecimiento, desarrollo, muerte y descomposición de raíces finas del pasto contribuye sin duda en el ciclo del fósforo, así como en el ciclo de otros elementos nutritivos.

En la literatura no se han encontrado informaciones completas sobre el ciclo de K en sistemas agrosilvopastoriles de pastoreo directo. De acuerdo con Spain y Salinas (56) la participación de los animales implica la exportación de K con los productos pecuarios y el reciclaje con las excreciones. El contenido de K en la orina es más alto que en las heces. Estos autores indican que gran parte del K que ingieren los ruminantes en el forraje es retornado a la pastura. La mayor parte de las praderas de corte deben ser fertilizadas intensivamente para compensar la extracción y remoción fuerte de K (56).

7.4.5. Sistemas de cultivo en callejones ("alley cropping")

La información disponible sobre inventarios y transferencias de K, Ca y Mg en sistemas agroforestales de cultivos en callejones es aún muy escasa (4, 43, 46, 48, 53, 54, 58). La ventaja de estos sistemas se basa en un mejor reciclaje de los elementos nutritivos, especialmente con la producción de residuos vegetales y su mineralización.

Algunos resultados obtenidos en CATIE han sido publicados por Kass *et al* (43) y Sánchez (54). En la Figura 7.6, publicada originalmente por Sánchez (54) se observan las reservas de potasio en el suelo (forma cambiante), en los callejones de poró con diferente espaciamiento (6 x 1, 6 x 2, 6 x 3 y 6 x 4 m) y el cultivo intercalado de maíz. La acumulación de K en los callejones de poró depende lógicamente del número de árboles en las hileras, disminuyendo de 258 kg K.ha⁻¹ (espaciamiento 6 x 1 m) a 105 kg K.ha⁻¹.a⁻¹ (espaciamiento 6 x 4 m). Las reservas en el maíz son equiparables en los diferentes arreglos.

En los estudios realizados en un ultisol en Nigeria (Lal, 46) se ha confirmado que en el transcurso de tres años en sistemas de callejones de *Leucaena* spp. y *Gliricidia sepium* se registra una disminución notable de K, Ca y Mg y en forma paralela un aumento de la acidez (pH, Al-cambiable).

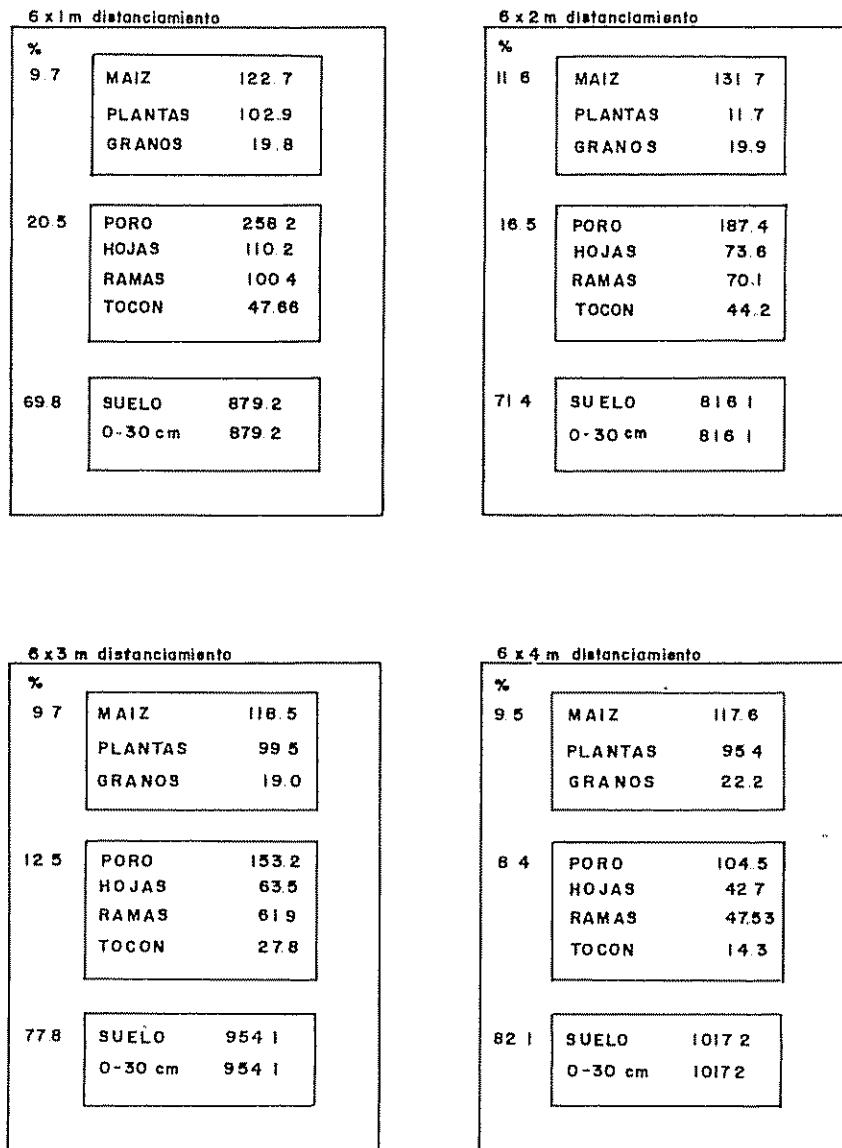


Figura 7.6. Reserva y transferencia de K de cultivos de maíz en callejones de poró (*Erythrina poeppigiana*) en CATIE ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; Sánchez, 54).

Los valores de transferencia de K, Ca y Mg en callejones de árboles leguminosos calculados por Szott (58) con base en una poda de $2,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ son los siguientes ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$):

	K	Ca	Mg
<u>Cassia reticulata</u>	37	25	6
<u>Gliricidia sepium</u>	37	22	8
<u>Erythrina spp.</u>	36	16	7
<u>Inga edulis</u>	24	15	4

Tal como se indicó en capítulos anteriores, aún existe un déficit muy grande de investigaciones para estos elementos en las diferentes condiciones climáticas, ecológicas y en diferentes combinaciones de cultivos.

7.5. RESUMEN

- El contenido y las formas de los elementos catiónicos (K, Ca, Mg, Al) de los suelos dependen de su material parental, de los procesos genéticos, especialmente de la capacidad de intercambio catiónico y del pH.
- En los ecosistemas forestales naturales la acumulación de estos elementos en la biomasa representa una reserva, dando estabilidad a los ecosistemas. Se discuten los pocos ejemplos conocidos en la literatura de áreas tropicales y subtropicales.
- Con base en datos de reservas y transferencias se presentan modelos de los ciclos de K, Ca y Mg, con un ejemplo de K para el ecosistema de llanura de San Carlos de Río Negro, Venezuela. En forma gráfica también se presenta el modelo de Al para el ecosistema montano de San Eusebio, Venezuela.
- Se comentan las necesidades de K, Ca y Mg de los cultivos, se complementan los datos sobre su comportamiento en sistemas de plantaciones forestales.
- Los ciclos de K, Ca y Mg en sistemas agroforestales se ilustran con resultados obtenidos en sistemas de café con laurel y café con poró. La extracción de K es notable, generalmente se produce un agotamiento de las reservas de K cambiante del suelo. Se discuten los problemas de acidificación y pérdidas de K, Ca y Mg de los sistemas.

- Los modelos de K, Ca y Mg para los sistemas de cacao con laurel y cacao con poró se basan en observaciones a largo plazo (cosechas de siete años, producción de residuos cuatro años).
- Se presentan algunos datos de K en sistemas agrosilvopastoriles. Con la "corta y lleva" de los pastos se producen pérdidas considerables de K.
- Se discuten algunos resultados obtenidos en sistemas de cultivos en callejones.

LITERATURA

1. ALPIZAR, L. et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) y café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. I. Biomasa y reservas nutritivas. Turrialba (C.R.) 35:233-242.
2. _____ et al. 1986. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with Cordia alliodora and Erythrina poeppigiana in Costa Rica. I. Inventory of organic matter and nutrients. Agroforestry Systems (Holanda) 4:231-257.
3. _____. 1986. Results of association of pastures with shade trees at Central Experiment of CATIE. In Advances in Agroforestry Research (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. Ed. by J.W. Beer; H.W. Fassbender; J. Heuveldop. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. p. 209-215.
4. BEER, J.W.; FASSBENDER, H.W.; HEUVELDOP, J. (eds.). 1987. Advances in Agroforestry Research (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. 379 p.
5. _____ et al. 1990. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with Cordia alliodora and Erythrina poeppigiana in Costa Rica. V. Productivity indices, organic matter models and sustainability over ten years. Agroforestry Systems (Holanda) 12:229-240.

6. _____, *et al.* 1991. Balance quinquenal de biomasa, productividad y sostenibilidad en dos sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) en Costa Rica. In Simposio Agroforestal en México. Nuevo León, Linares, Méx., s.n. p. 97-110.
7. BERNHARD-REVERSAT, F. 1972. Decomposition de la litiere de feuilles en foret ombrophylle de basse Cote-d'Ivoire. *Oecologia Plantarum (Francia)* 7:279-300.
8. BORNEMISZA, E.; ALVARADO, A. 1975. Soil management in Tropical America. Raleigh, N.C., EE.UU., North Carolina University. 565 p.
9. BOYER, J. 1973. Cycles de la matiere organique et des element minéraux dans une cacaoyere camerounaise. *Cafe, Cacao, The (Francia)* 17:2-23.
10. BRUIJNZEEL, L.A.; WIERSUM, K.F. 1985. A nutrient balance sheet for *Agathis dammara* Warb. plantation forest under various management conditions in Central Java, Indonesia. *Forest Ecology and Management (Holanda)* 10:195-208.
11. CARVAJAL, J.F. 1984. Cafeto - cultivo y fertilización. 2 ed. Berna, Suiza, Instituto Internacional de la Potasa. 254 p.
12. COMMITTEE ON TROPICAL SOILS (EE.UU.). 1972. Soils of the humid tropics. Washington, D.C., EE.UU., National Academy of Sciences. s.p.
13. EDWARDS, P.J. 1977. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. II. The production and disappearance of litter. *Journal of Ecology (G.B.)* 65:971-992.
14. _____; GRUBB, P.J. 1977. Studies of mineral cycling in a montane rain forest in New Guinea. *Journal of Ecology (G.B.)* 65:943-969.
15. EGUNJOBI, J.K.; BADA, S.O. 1979. Biomass and nutrient distribution in stands of *Pinus caribaea* in the dry zone of Nigeria. *Biotropica (EE.UU.)* 11:130-135.
16. FASSBENDER, H.W.; GRIMM, U. 1981. Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. II. Producción y descomposición de residuos vegetales. *Turrialba (C.R.)* 31:39-47.

17. _____.; GRIMM, U. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. IV. Modelos y conclusiones. Turrialba (C.R.) 31:101-108.
18. _____, et al. 1985. Ciclos de la materia orgánica y elementos nutritivos en cultivos tropicales permanentes, experiencias con cacao. *In* Seminar on Nutrient Research and Low Input Agriculture for the Tropics. Anais. Ed. por P. Cabala. Itabuna, Bra., CEPLAC. p. 231-257.
19. _____, et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (*Coffea arabica*) con laurel (*Cordia alliodora*), café con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. III. Modelos de la materia orgánica y elementos nutritivos. Turrialba (C.R.) 35:403-413.
20. _____.; BORNEMISZA, E. 1987. Química de suelos. San José, C.R., IICA. 420 p.
21. _____.; ALPIZAR, L. 1987. Criteria for the evaluation of organic matter and nutrient cycling in agroforestry systems. *In* Advances in Agroforestry Research (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings of a seminar. Ed. by J.W. Beer; H.W. Fassbender; J. Heuvelop. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. p. 91-103.
22. _____, 1987. Nutrient cycling in agroforestry systems of coffee (*Coffea arabica*) with shade trees in the Central Experiment of CATIE. *In* Advances in Agroforestry Research (1985, Turrialba, C.R.). Proceedings. Ed. by J.W. Beer; H.W. Fassbender; J. Heuvelop. CATIE. Serie Técnica. Informe Técnico no. 117. p. 155-165.
23. _____, 1987. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. CATIE. Serie de Materiales de Enseñanza no. 29. 475 p.
24. _____, et al. 1988. Modelling 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) 6:49-62.
25. _____, et al. 1991. Ten years balances of organic matter and nutrients in agroforestry systems at CATIE, Costa Rica. Forest Ecology and Management (Holanda) 45:173-183.

26. FÖLSTER, H.; KHANNA, P. 1976. A tropical evergreen forest site with perched water table, Magdalena Valley, Colombia. *Oecologia Plantarum* (Francia) 11:298-320.
27. _____; SALAS, G. DE LAS. 1976. Litter fall and mineralization in three tropical evergreen forest stands, Colombia. *Acta Científica de Venezuela* (Ven.) 37:192-202.
28. GEUS, J.G. DE. 1978. Fertilizer guide for the tropics and subtropics. Zurich, Suiza, Centre d' Etude de l'Azote. 773 p.
29. _____. 1975. Mineral cycling in a tropical moist forest ecosystem. Athens, Ga., EE.UU., University of Georgia Press. 248 p.
30. GREENLAND, D.J.; KOWAL, J.M.L. 1960. Nutrient content in a moist tropical forest of Ghana. *Plant and Soil* (Holanda) 12:154-174.
31. GRIMM, U.; FASSBENDER, H.W. 1981. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. III. Ciclo hidrológico y translocación de elementos químicos con el agua. *Turrialba* (C.R.) 31:89-99.
32. HASE, H.; FÖLSTER, H. 1982. Bioelement inventory of a tropical (semi) evergreen seasonal forest on eutrophic soils, Western Llanos, Venezuela. *Oecologia Plantarum* (Francia) 17:331-346.
33. IMBACH, A. C. *et al.* 1989. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poró (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. IV. Water balances, nutrient inputs and lixiviation. *Agroforestry Systems* (Holanda) 8:267-287.
34. _____; FASSBENDER, H.W.; BEER, J.W. 1992. Producción de residuos vegetales de cacao (*Theobroma cacao*) con laurel (*Cordia alliodora*) y con poró (*Erythrina poeppigiana*) en Costa Rica. *Theobroma* (Bra.). (sin publicar).
35. HENDRY, C.D.; BERISH, C.W.; EDGERTON, E.S. 1984. Precipitation chemistry at Turrialba, Costa Rica (Central America). s.l., EE.UU., Water Resources Research. s.p.

36. HEUVELDOP, J. et al. 1985. Sistemas agroforestales de café (Coffea arabica) con laurel (Cordia alliodora) y de café con poró (Erythrina poeppigiana) en Turrialba, Costa Rica. II. Producción agrícola, maderable y de residuos vegetales. Turrialba (C.R.) 35:347-355.
37. _____, et al. 1988. Modelling agroforestry systems of cacao (Theobroma cacao) with Cordia alliodora and Erythrina poeppigiana in Costa Rica. II. Cacao and wood production; litter production and decomposition. Agroforestry Systems (Holanda) 6:37-48.
38. JORDAN, C.F. 1982. The nutrient balance of an Amazonian rain forest. Ecology (EE.UU.) 63(3):647-654.
39. _____. 1981. Biogeochemical cycles and tropical forest. The American Naturalist (EE.UU.) 117:167-180.
40. _____; ESCALANTE, G. 1980. Root productivity in Amazonian rain forest. Ecology (EE.UU.) 61:14-18.
41. _____; HERRERA, R. 1981. Tropical rain forest: are nutrients really critical? The American Naturalist (EE.UU.) 117:167-180.
42. _____. 1985. Nutrient cycling in tropical forest ecosystems. New York, EE.UU., J. Willey. 190 p.
43. KASS, D.L. et al. 1989. Resultados de seis años de investigación de cultivo en callejones (alley cropping) en "La Montaña", Turrialba, Costa Rica. El Chasqui (C.R.) no. 19:5-24.
44. KLINGE, H. 1973. Biomass and organic matter in the soil of a tropical rain forest of Central Amazonia. Acta Científica Venezolana (Ven.) 24:174-181.
45. _____. 1979. Bilanzierung von Hauptnährstoffen im Ökosystem tropischer Regenwald (Manaos). Biogeotropa 7:59-77.
46. LAL, R. 1989. Agroforestry systems and surface management of a tropical alfisol. III. Changes in soil chemical properties. Agroforestry Systems (Holanda) 8:113-132.

47. LUNDGREN, B. 1978. Soil conditions and nutrient cycling under natural and plantation forest in Tanzanian highlands. Swedish University of Agricultural Sciences. Dept. of Forest Soils. Reports in Forest Ecology and Forest Soils no. 31. s.p.
48. NAIR, P.K.R. 1988. Agroforestry systems in the tropics. Dordrecht, Holanda, Kluwer. 664 p.
49. ODUM, P.H.; PIGEON, R.F. (eds.). 1970. A tropical rain forest. Springfield, Va., EE.UU., Atomic Energy Commission. s.p.
50. OHLER, F.M.J. 1980. Phytomass and mineral content in undisturbed forest. CELOS Rapporten (Surinam) no. 132. s.p.
51. RODRIGUEZ, R.A. 1985. Producción de biomasa de poró gigante (Erythrina poeppigiana) y king grass (Pennisetum purpureum x P. typhoides) intercalados en función de la densidad de siembra y frecuencia de poda de poró. Tesis Mag. Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 96 p.
52. SANCHEZ, J.F. 1989. Análisis de la estabilidad y dinámica de sistemas de producción de cultivos en callejones. Tesis Mag.Sc. Turrialba, C.R., CATIE. 174 p.
53. SANCHEZ, P.A. 1981. Suelos del trópico, características y manejo. IICA. Serie de Libros y Materiales Educativos no. 48. 660 p.
54. _____. 1987. Soil productivity and sustainability of agroforestry systems. In Stepler, H.A.; Nair, P.K.R. Agroforestry, a decade of development. Nairobi, Kenia, ICRAF. 335 p.
55. SANTANA, M.B.M.; CABALA, R.P. 1984. Reciclagem de nutrientes en una plantacao de cacau sombreada com Erythrina. In International Cocoa Research Conference (9., 1984, Togo). Proceedings. Lagos, Nigeria, Cocoa Producers Alliance. p. 205-210.
56. SPAIN, J.M.; SALINAS, J.G. 1985. A reciclagem de nutrientes nas pastagens tropicais. In Reciclagem de nutrientes e agricultura de baixos insumos nos tropicos. Anales. Ed. por P. Cabala. Itabuna, Bra., CEPLAC. s.p.

57. STEPPLER, N.; NAIR, P.K.R. 1978. Agroforestry, a decade of development. Nairobi, Kenia, ICRAF. 335 p.
58. SZOTT, L.T. et al. 1988. Agroforestry systems for acid soils in the humid tropics. s.n.t. Presented of American Soc. of Agronomy Annual Meeting. American, Ca. (Sin publicar).
59. TANNER, E.V.J. 1977. Four montain rain forest of Jamaica: a quantitative characterization. *Journal of Ecology* (G.B.) 65:883-896.
60. _____. 1980. Litterfall in montane rain forest of Jamaica and its relation to climate. *Journal of Ecology* (G.B.) 68:833-848.
61. _____. 1981. The decomposition of the leaf litter in Jamaican forest. *Journal of Ecology* (G.B.) 69:263-275.
62. YOUNG, A. 1989. Agroforestry for soil conservation. CAB-International /ICRAF. Science and Practice of Agroforestry no. 4. 276 p.

INDICE DE ESPECIES

Este no es un índice exhaustivo. Refiere a las especies cuando el texto encierra un nivel de relevancia importante.

A

- Abaca, Musa textilis, 31
- Acacias, Acacia arabica, dealbata, mearnsii, 36, 64
- Acai, Euterpe oleracea, 33, 65
- Acaju, Anacardium occidentale, 32
- Aceituno, Simarouba glauca, 83
- Achiote, Bixa orellana, 33, 82
- Achiotillo, Vismia guianensis, 55, 83
- Achira, Canna edulis, 77
- Achocha, Cyчанthera pedata, 77
- Acrocarpus, Acrocarpus fraxinifolius, 78
- Agati, Sesbania bispinosa, 37
- Agave, espadín, Agave striata, 79
- Aguacate, Persea americana, 32, 63, 67, 57, 77, 78, 79, 85, 93, 96
- Aguaje, Mauritia flexuosa, 75
- Ajonjolí, sésamo, Sesamum indicum, 31, 33
- Albicia, lagarto, Albizia spp., 36, 65, 244
- Alfalfa del Brasil, Stilosanthes gracilis, 35
- Alfalfa, Medicago sativa, 35, 140
- Algarrobo, Prosopis chilensis, Prosopis juliflora, Prosopis pallida, 37, 94, 95
- Algodón, Gossypium spp., 31, 33, 140
- Almendro, Prunus amygdalus, 79
- Almendro, Terminalia catappa, 83
- Amapola, Pseudobombax ellipticum, 86

Anona, Annona reticulata, 67, 83
Añil, índigo, Indigofera spp., 40
Araucaria brasileña, Araucaria augustifolia, 36, 75
Arbol de pan, Artocarpus comunis,
A. altitis, 32, 66, 67, 68
Arbol de tung, Aleurites spp., 31, 72
Arracacha, Arracacia xanthoriza, 31
Arroz, Oryza sativa, 31, 33, 34, 57, 61, 74, 82, 140
Ashipa, Pachyrhizus ahipa, 77
Avena, Avena sativa, 35

B

Babassu, taparo, Orbignya martiana, 64
Badea, Passiflora quadrangularis, 76
Balsa, Ochroma spp., 37, 57, 63, 66, 83
Bambú, Arundinaria gigantea, 79
Bambú, Bambusa spp., 83
Bananos, plátanos, Musa spp., 32, 33, 34, 63, 67, 69, 78,
139, 140, 142
Biribá, Rollinia mucosa, 76
Burití, burutí moriche, Mauritia flexuosa, rinifera, 33, 65

C

Cacao, Theobroma cacao, 32, 34, 57, 63, 65, 67, 68, 140, 141,
146, 149, 152, 249, 256-278, 354-371, 414-417, 451-458
Cadam, Anthocephalus chinensis, 36, 75
Café, Coffea arabica, robusta, 32, 33, 34, 43, 62, 69, 140-142,
239-247, 251, 343-354, 408-411, 443-450
Caimito, Chrysophyllum cainito, 66, 74, 84
Calabaza, Cucurbita spp., Crescentia spp., 32, 61

Camote, Ipomea batatas, 31, 57, 61, 68, 82, 152
Canela, Cinnamomun zeylanicum, 32
Canelo, Nectandra salicifolia, 57, 84
Canjel, Citrus spp., 84
Caña de azúcar, Saccharum officinarum, 83, 141
Caña de azúcar, Sacharum spp., 32, 33, 73
Caoba, Swietenia macrophylla, 37, 38, 61, 64, 65, 78
Carambola, Averrhoa carambola, 84
Carao, Cassia grandis, 93
Cardamomo, Elletaria cardomomum, 32, 57, 68
Cas, Psidium friedrichsthalianum, 84
Casia, Cassia siamea, 36, 61
Castaño, Castanea sativa, 84
Castaña del Pará, Bertholletia excelsa, 62, 67
Casuarina, pino australiano, Casuarina equisetifolia, 37, 54, 70, 71, 79
Caucho, hule, jebe, Hevea brasiliensis, 32, 33, 57, 65, 81, 95, 373,
Cebada, Hordenum spp., 31
Cebolla criolla, Allium cepa, 77, 81
Cedro amargo, Cedrela mexicana, 57
Cedro, Cupressus sempervirens L., 57, 64, 70, 71, 79
Ceiba, Ceiba pentandra, 32, 37, 64, 85
Centrosema forrajera, Centrosema spp., 35
Chambira, Astrocaryum chambira, 75
Chaya, Cnidoscolus chayamansa, 79
Chayote, Sechium edulis, 32

Chile, Capsicum frutescens, 81, 82
Chuchuashi, Maytenus krukovii, 75
Ciprés, Cupressus lusitanica, 9, 36, 56, 61, 64, 70, 85, 226,
341, 406, 407, 441, 442
Ciricote, Cordia dodecandra, 77
Ciruelo, Spondias purpurea, 55
Cítricos, C. sinensis, C. aurantifolia, C. grandis, 37, 55, 57,
62, 64, 67, 73, 78, 85, 140
Clavohuasca, Mandevilla scabra, 75
Clítoria, zapato de reina, Clitoria ternatea, 35
Cobano, Swietenia humilis, 78
Coca, Erythroxylon coca, 62
Coco, Cocos nucifera, 31, 57, 62, 66, 68, 78, 85, 103
Cocobolo, Dalbergia retusa, 37, 65, 84
Cocona, Solanum sessiliflorum, 74
Cola, Cola spp., 32
Copalchi, Croton nivens, 71
Corozo/Palma Real, Scheelea costaricensis, 86
Cortés amarillo, Tabebuia chrysantha, 84
Coyol, Acrocomia vinifera, 84
Crotalaria, Crotalaria spp., 35, 66
Cuajiniquil, Inga spp., 84
Cucaracha, Billia colombiana, 84
Cuchi col, Amaranthus spp., 77
Culantro, Coriandrum sativum, 61

D

Dátil, Phoenix datilífera, 32
Dolicos, Dolichos lablab, 35
Durazno, Prunus persica, 79, 84

E

Ebano, zapote enano, Diospyros conazatti, 94
Espavel, mijao, Anacardium excelsum, rhinocarpus, 36, 55, 65, 71, 86
Eucalipto, Eucalyptus alba, camaldulensis, deglupta, grandis, globulus, saligna, 37, 61, 64, 65, 75, 81, 86, 91, 92, 227, 291

F

Festuca alta, Festuca arundinacea, 35
Forrajero. Paja del Llano, Trachypogon spp., 35
Frijol caupí, Vigna sinensis, 31, 35, 61, 76
Frijol tercipele, Stizolobium deeringianum, 35, 61, 76, 78, 82, 279
Frijoles, caraotas, Phaseolus spp., 31, 33, 35, 57
Fruta de pan, Artocarpus cummunis, 84
Fruto de jack, Artocarpus integrifolia, 68

G

Gallinazo, Schizolobium parahybum, 86, 93
Gavilán, Albizia spp., 86
Genipapo, Genipa americana, 37
Granadilla, maracuyá, Passiflora edulis, 32, 76
Granado, Punica granatum, 79
Gravilea, Grevillea robusta, 37
Graviola, Annona muricata, 66, 78
Guaba, Inga spp., 32, 37, 55, 57, 62, 64, 65, 70, 71, 74, 77
Guachipilín, Diphysa robinoides, 55, 56, 73, 84, 93
Guácimo molenillo, Luehea candida, 86
Guácimo, Guazuma ulmifolia, 55, 84
Guanábana, Annona muricata, 32, 66, 67, 76, 83

Guanacaste, Enterolobium cyclocarpum, 57, 86, 93
Guandú, frijol de palo, Cajanus indicas, cajan, 31, 34, 57, 69, 283
Guapinol, Hymenaea courbaril, 55, 93
Guaraná, Paullinia cupana, 32, 33, 57, 68
Guarumo, Cecropia spp., 55, 84
Guava, Inga spp., 53, 62, 84
Guayaba, Psidium quajaba, 32, 63, 64, 75, 78, 79, 84, 93, 94
Guayacán, Tabebuia chrysanta, 66

H

Haba blanca, Canavalia ensiformis, 76
Higuera, Ficus carica, 79
Higuerilla, Ricinus communis, 84
Higuerón, Ficus spp., 94
Hombre grande, Quassia amara, 84
Huasai, Euterpe precatoria, 75
Huevos de caballo, Stemmadenia glabra, 84

I

Indio desnudo, Bursera simaruba, 55, 56, 63, 78, 84
Itabo, Yucca elephatipes, 84

J

Jambo, Eugenia jambos L., 62
Jaúl, lambran, Alnus jorullensis, 9, 36, 288, 292
Jengibre, Zingiber officinale, 32, 57
Jícara, Crescentia cujete, 82, 84
Jobo, Spondias mombin, 70, 86
Joco, jocote, ciruelo, Spondias spp., 70
Jocote, Spondias purpurea, 84, 93, 94

K

Kiri, Paulownia tomentosa, 37

Kudzú tropical, Pueraria phaseoloides, 35

L

Lagartillo, Zanthoxylum spp., 55, 84

Laurel, Cordia alliodora, 37, 55, 57, 61, 65, 69, 70, 75, 76, 86, 91, 93, 231, 235, 239, 244, 247-272, 286, 292, 343-357, 360, 362, 364-368, 410-412, 414-419, 445-460

Leucaena, Leucaena glauca, leucocephala, 37, 54, 57, 61, 70, 72, 75, 94, 95, 97, 217, 337, 338, 461

Limón ácido, Citrus aurantifolia, 75, 84

Llama del bosque, Spathodea campanulata, 75

Llanchama, Olmedia sp.

M

Macal, Xanthosoma spp., 78

Maculis, Tabebuia rosea, 70

Madero negro, Gliricidia sepium, 9, 54, 56, 61, 68, 69, 70, 71, 73, 76, 84, 283, 285, 286, 290

Madroño, Calycophyllum candidissimum, 84

Maíz, Zea mays, 31, 33, 34, 57, 61, 69, 73, 78, 140, 279, 280, 332, 333

Malanga, Colocasia esculenta, 69, 332, 333

Malinche, Caesalpinia pulcherrima, 84

Mamey, Mammea americana, 86

Mamón chino, Nephelium lappaceum, 84

Mamón, Meliocca bijuga, 84

Mandarina, Citrus reticulata, 84

Mangle, Conocarpus erecta, 84

Mango, Mangifera indica, 32, 55, 57, 63, 66, 67, 86, 96

Maní, Arachis hypogaea, 31, 57, 76

Manzana de agua, Eugenia syzygium, malaccensis, 75, 86
Manzana rosa, Eugenia jambos, 67, 86, 96
Manzano, Malus domestica Borkh., 79
Marañón, Anacardium occidentale, 66, 67, 71, 74, 85, 93
Marauba, Marauba arundinacea, 31
Masico, ojoche, feguó, guaimaro, Brosimum, utile, alicastrum,
37, 55, 94
Matapalo, Ficus pertusa, 71
Mate, Ilex paraguayensis, 32
Melina, Gmelina arborea, 37, 61, 63, 78
Micay, Axonopus spp., 36
Mijao, Anacardium excelsa, 65
Mijo, millo, Pennisetum glaucum, 36
Mimbros, Averrhoa bilimbi, 85
Molidero, Psidium rensonianum, 85
Mora blanca m.negra, Morus alba L. and Morus negra L.,
78
Mora, Chlorophora tinctoria, 85
Mostaza, Brassica juncea, 37
Muñeco, Cordia nitida, 85
Murta, mirto, Calytranthus costarricensis, 85

N

Nance, Byrsonima crasifolia, 55, 71, 85
Naranja agria Citrus aurantium, 32, 78, 85
Negrito, Simarouba glauca, 77
Níspero, Achras sapota, 85
Nogal, Juglans spp., 64
Nopal, Opuntia spp., 79
Nuez criolla, Carya mexicana, 72

Nuez de cáscara papel, nogal, pecan, Carya illinoensis, 79

Nuez de Pará, Brasil, Bertholletia excelsa, 74

Nuez moscada, Myristica fragrans, 67, 85

Ñame, Dioscorea spp., 31, 33, 57, 68

O

Olivo, Olea europea, 31, 79

Orégano, Lippia spp., 78

P

Palma africana, Elaeis guineensis, 86

Palma babacu, Orbignya oleifera, 32

Palma catetu, Areca catecu, 32

Palma datilera, Phoenix dactilifera, 79

Palma de aceite, Eleais guineensis, 31, 33, 57

Palo del rayo, Parkinsonia aculeata, 37

Papa de sogá, Dioscorea trifida, 77

Papa, Solanum tuberosum, 31, 34

Papaturro, Coccoloba spp., 85, 69, 79

Papaya, Carica papaya, 32, 62, 85

Paraíso, Melia azederach, 67, 79

Pasto alemán, Echinochloa polystachya, 34

Pasto alpiste, Phalaris spp., 35

Pasto bahía, Paspalum spp., 35

Pasto bermuda, Cynodon dactylon, 35

Pasto bromo suave, Bromus spp., 35

Pasto elefante, Pennisetum purpureum, 34, 35, 78, 286

Pasto estrella, Cynodon plectostachyus, 34, 35, 251, 287, 311, 498

Pasto Guatemala, Tripsacum laxum, 35

Pasto gordura o capim melao, Melinis minutiflora, 34, 35

Pasto guinea, Panicum maximun, 34, 78, 285

Pasto guinea, Panicum spp., 35

Pasto Kentucky, Poa pratensis, 35

Pasto "King grass", Pennisetum purpureum x Pennisetum tiphoides, 286

Pasto kikuyo, Pennisetum clandestinum, 34, 35, 288

Pasto lanudo, Holcus lanatus, 35

Pasto pangola, Digitaria decumbens, 308

Pasto par, Brachiaria mutica, 34, 35

Pasto Rhodes, Chloris gayana, 35

Pasto yaragua, Hyparrhenia rufa, 34, 35

Pega-pega, Desmodium spp., 35

Pejibaye, chontaduro, Bactris gasipaes, Guilielma gasipaes, utilis, 32, 57, 62, 65, 74, 77, 85

Pera, Pirus domestica Borkh., 79

Piacaba, Allaqoptera cf. pseudocalyx, 62

Pich, Enterolobium cyclocarpum, 67

Pimienta, Piper nigrum, pimenta, dioica, 32, 57, 63, 68, 78

Pino aparrado, Podocarpus spp., 36, 182

Pino, Pinus spp., 36, 61, 64, 75, 86, 91, 226, 227, 228, 341, 406, 407, 441, 442

Piña, Anana comosus, 32, 33, 34, 62, 74, 76, 78

Pion de Indias, Jatropha curcas, 67, 77

Piuela, Bromelia pinquin, 71

Piquia, Caryocar villosum, 33

Piretro, Pyrethrum cinerariaefolium, 32

Pochote, Bombacopsis fendleri, 86

Pomarosa, Eugenia jambos, 55, 67

Por, bucare, Erythrina berteriana, fusca, glauca, poeppiqiana, velutina, 56, 57, 65, 66, 70-73, 85, 86,

Pujin, Caltathea allouia, 77

Q

- Quebracho, Lysiloma seemaii, 86
Quinacola grosella, Phyllanthus acidus, 85
Quizarrá, Phoebe valeriana, 76

R

- Rabo de iguana, Calopogonium mucunoides, 35
Ramio, Broehmeria nivea, 31
Ramón, Brosimum alicastrum, 94
Raspa guacal, Crescenthia alata, 85
Ratón, Rapanea ferruginea, 85
Ricino, Ricinus communis, 31, 69
Roble sabana, Tabebuia rosea, 56, 70, 71, 86, 93

S

- Samán, Pithecellobium saman, 65, 66, 93, 285, 286
Sandía, melón, Citrullus spp., 32
Santa María, Miconia argentea, 55, 56
Sapucaia, Lecythis usitata, 92
Sauce, Salix humboltiana, 71
Seje, Jessenia spp., 33
Soncoya, Annona purpurea, 85
Sonzapote, Licania platypus, 85
Sorgo, Sorghum bicolor, 31, 33, 61, 212
Sorva, Couma spp. 33
Soya, Glycine spp., 31, 35, 57, 81, 140

T

- Tabaco, Nicotiana tabacum, 32, 33 47, 141
Tamarindo, Tamarindus indica, 85
Tamshi, Heteropsis jenmani, 75

Targua, Crotón spp., 85
Taro asiático, Amorphophallus companulatus, 57
Tatuán, Colobrina arborescens, 78
Té, Thea sinensis, 32, 57
Teca, Tabebuia rosea, Tectona grandis, 37, 55, 61, 66,
71, 78, 86, 291
Terminalia, Terminalia, catappa, ivorensis, superba, 37, 57,
65, 67
Tibilote, jiguilote, Cordia alba, 85
Tomate criollo, Lycopersicon esculentum, 77, 141
Toronja, Citrus grandis, 78, 85
Tortas purutu, Phaseolus lunatus, 76
Trébol blanco, Melilotus alba, 35
Trébol de pájaro, Lotus corniculatus, 35
Trébol, Trifolium spp., 35
Trigo tropical, Coix Lachryma-jobi, 77
Trigo, Triticum spp., 31
Tumbo, Passiflora mollissima, 74
Tuna, Nopalea cochinellifera, 85

U
Ungurahui, Jessenia bataua, 75

V
Vainita, Vigna sesquipedalis, 76
Veza común, Vicia comun, 35
Vid, Vitis vinifera L., 79

Y

Yuca, mandioca, Manihot utilissima, esculenta, 31, 33, 57, 61, 68, 69, 78, 279

Yucateca y tabasqueña, chaya, Chidoscolus chayamansa, 78

Yute, Corchorus capsularis, 32

Z

Zapallo, Cucurbita spp., 61, 77, 82

Zapote mamey, Lucuma mamosa, 67

Zapote, Manilkara sapota, 32, 57, 64, 66

Zapote, Pouteria sapota, 85

Zornia, Zornia diphylla, 35

INDICE DE MATERIAS

Este no es un índice exhaustivo. Refiere a los términos cuando el contexto encierra un nivel de relevancia.

A

- Abonos verdes, 219, 220
- Acido húmico, 175
- Acumulación (véase reservas), 26, 321, 382, 431, 457
- Africa, 13, 35, 60
- Agricultura, 30, 38, 39
 - migratoria, 38, 39, 61, 87, 205, 207, 209, 295
 - semipermanente, 209, 214
- Agrodasonomía, 44
- Agroecosistemas, 12, 30, 31, 40, 41, 42, 102, 205, 331, 403, 440
- Agroforestería, 44, 45, 47, 338, 345, 407
- Agrosilvicultura, 49, 60
- Agua en
 - agroecosistemas, 42, 102
 - en suelos, 25, 59, 127, 133, 171
 - movimiento de, 129
 - sistemas agroforestales, 100, 142
- Aire, 3, 4
 - suelo, 25, 27
- Alelopatía, 9, 59
- Alley cropping (ver cultivos en callejones)
- Altura (msnm), 3, 15, 118, 177
- Aluminio, 134, 183, 430, 436
- Amazonia, 38, 62, 66, 67, 76, 94, 136, 171, 319, 335
- América, 13, 30, 34, 38, 44, 53, 61, 63, 66, 68, 76, 81, 91, 95, 102, 171, 320, 395, 396
 - Central, 37, 38, 94, 171, 395, 396
- Arboles,
 - de múltiple propósito, 51, 54, 80, 102
 - de sombra, 47, 49, 102, 276, 346, 353, 445, 456, 449, 460
 - fijadores de N, 51, 96, 97
 - frutales, 32, 47, 49, 52, 63, 66, 95, 102
 - productores de forraje, 47, 49, 51, 90, 96
 - productores de madera, 51, 52, 55, 63, 92, 102
- Asia, 13, 60, 80, 95
- Asociaciones agroforestales, 53
- Atmósfera, 1, 115
- Azufre, 173, 174, 175, 177

B

Balance de nutrimentos, (ver elementos nutritivos)

Balance hídrico, 121, 122

Barbechos, 59, 214, 215, 295

Biomasa, 51, 176, 195, 236, 248, 250, 254, 255, 257, 259, 260, 409, 415

Biosfera, 1, 2, 10, 27, 115

Brasil, 37, 38, 61, 64, 92, 135, 139, 180, 191, 192, 197, 268, 319, 321, 340, 396, 436

Bolivia, 38

C

Calcio, 134, 152, 154, 156, 165, 179, 183, 206, 208, 212, 221, 234, 277, 326, 406, 431, 435, 440, 460, 448

Cambio catiónico, 209

Carbono (ver materia orgánica)

Cercas vivas, 47, 49, 52, 54, 56, 64, 70, 86, 96, 102, 291

Cereales y granos (véase índice de especies)

Chile, 92, 95

Clima, 26, 47

Cobertura del suelo, 58, 211

Competencia, 59

Conservación, 13, 27, 40, 51

Costa de Marfil, 135, 180, 188, 197, 201, 327, 334, 351, 432, 471

Costa Rica, 33, 44, 53, 55, 61, 65, 66, 67, 71, 72, 75, 81, 92, 96, 118, 122, 141, 145, 149, 153, 158, 172, 197, 226, 346, 382

Cultivo en callejones o fajas, 70, 278, 279, 289

Colombia, 37, 38, 65, 69, 70, 94, 180, 188, 191, 192, 197, 221, 319, 321, 396, 436

D

Denitrificación, 24

Deposición de nutrimentos

· en lluvias, 136

· en residuos vegetales, 10, 26

Descomposición de materia orgánica, 38, 165, 190, 242, 295

Diagramas climáticos, 118, 199, 158

Diagramas de flujos, 10

E

Economía, 30, 43
Ecosistema, 22, 23, 27, 40, 115, 176, 204, 205, 295, 318, 320, 324, 382, 398, 401, 422, 463
Ecuador, 37, 38, 64, 65, 76
Elementos nutritivos, 1, 2, 10, 36, 102, 158, 215, 221, 340, 346, 356, 362, 375, 378
El Salvador, 396
Encalado, 136, 398, 434
Energía solar, 3, 8, 98, 115
Erosión, 14, 24, 38, 58
Especies (véase índice de)
Especies y condimentos (véase índice de especies)
Estimulantes (véase índice de especies)
Estratosfera, 14
Estructura del suelo, 124, 234
Evaporación, 1, 2, 25, 58, 115, 132, 139, 150
Evapotranspiración, 117, 120, 121, 122, 139
Explotación agrícola (véase agricultura)
Exposición, 3

F

Fertilidad del suelo, 36, 38, 39, 49, 209
Fertilización, 4, 35, 41, 60, 89, 279, 380, 404
Fertilizantes, 279, 377, 404, 410, 412, 416
Fibras (cultivos de, (véase índice de especies)
Fijación de

- fosfatos, 397, 422
- nitrógeno, 9, 26, 51, 59, 88, 95, 210, 212, 338

Filipinas, 80, 225
Fincas (véase agricultura sistemas)
Forrajes (véase índice de especies)
Fósforo, 134, 135, 154, 165, 168, 205, 234, 278, 326, 395, 400, 406, 422

- en sistemas agroforestales, 406, 422
- en suelos, 395

Fotosíntesis, 1, 4, 101
Frutas (véase árboles, índice de especies)

G

Ganado (véase animales), 4, 30, 90, 211
Granos básicos (ver cultivos agrícolas)
Guatemala, 61, 197, 207, 221

H

Haití, 61
Hierro, 134, 135, 183
Hidrosfera, 1, 2
Hombre (ver ser(es) humano(s)), 8
Huertos caseros, 42, 43, 79, 81, 102
Humedad relativa del aire, 3, 59
Humificación, 24, 165, 168, 266
Humus, 101, 165, 169
Humus, bruto, 169

I

India, 157
Intercambio aniónico, 26
Intercambio catiónico, 26, 209
Intercepción, 24, 25, 132, 139, 143, 146
Indonesia, 80, 225, 339

J

Jamaica, 186, 197, 319, 321, 436

K

Kenia, 139, 150

L

Lavaje foliar, 25, 26
Leguminosas (véase índice de especies)
Litosfera, 1, 2
Lixiviación, 4, 26, 117

L

Lluvia, 1, 2, 4, 5, 25, 26, 90, 100, 117, 118, 132, 135, 136, 142, 147, 171, 320, 326, 377

M

Magnesio, 134, 135, 154, 156, 165, 179, 234, 278, 281, 430, 434, 440, 441, 442, 448, 460, 463
Malasia, 80, 180, 201, 375, 436
Manganeso, 24, 25, 26
Mantillo (capa de), 59, 134, 135, 183, 206, 234, 277, 323, 339, 345, 353, 368, 376, 399, 401, 415, 436, 445
Materia orgánica, 6, 10, 22, 25, 36, 102, 165, 166, 170, 173, 176, 185, 191, 203, 205, 209, 295
Mecanización, 59
Medicinales (plantas, véase índice de especies), 32, 57, 75
México, 61, 64, 66, 69, 70, 72, 77, 79, 81, 92, 139, 233, 332, 396
Micorriza, 59
Mineralización, 26, 38, 181, 184
Modelos, 15, 16, 17, 22, 24, 25, 26, 100, 202, 230, 323, 400, 437
Moder, 169
"Mulch", 58, 59, 215
Mull, 169

N

Nicaragua, 71
Nigeria, 71, 134, 135, 201, 281, 339
Nitrificación, 315
Nitrógeno, 134, 135, 136, 153, 154, 156, 165, 168, 234, 278, 313, 314, 315, 318, 320, 322, 325, 330, 331, 333, 335, 338, 339, 343, 353, 357, 360, 363, 360, 370, 372, 377, 381, 382

O

Organismos, 165, 166, 168, 170
· autótrofos, 6
Ozono, 14

P

Panamá, 71, 135, 180, 188, 191, 192, 197, 221, 327, 399, 436
Papua, 186, 191, 399, 436
Pendiente(s), 5
Perú, 38, 74, 201
pH, 134, 137, 152, 169, 171, 469
pH del suelo, 6, 175
Poda, 229, 383, 410, 450
Potasio, 134, 135, 153, 154, 156, 165, 179, 183, 205, 234, 278, 281, 326, 351, 376, 385, 388, 394, 404, 406, 408, 410, 456, 465, 466, 476, 477, 487, 494
Producción agrícola (véase agricultura), 195, 205, 207, 217, 230, 237, 240
Producción de madera, 215, 225, 240
Producción de residuos (mantillo), 195, 197, 202, 230, 241, 242, 245
Producción primaria neta, 117, 201, 202, 271
Puerto Rico, 134, 135, 177, 180, 186, 201, 225, 321, 436
Parasitismo, 9
Pastos (ver índice de especies)

Q

Quema, 38, 205, 295, 405, 440

R

Radiación, 4, 23, 120, 130, 158
Raíces, 24, 345
Recursos naturales, 10, 27
Regeneración forestal, 38, 221, 295
Reservas (véase materia orgánica N, P, K...), 24, 101, 183, 184, 321, 347, 422, 458
Residuos vegetales, 101, 195, 202, 230, 241, 347, 354, 382, 405, 409, 414, 447
Respiración, 25
Retención de agua, 6, 128
Rocas, 1, 313, 395, 397, 429
Rompevientos, 47, 52, 70, 102
Rotación de cultivos, 35, 60, 206

S

Sistemas

- agrícolas, 10, 13, 39, 43
 - agroforestales, 10, 45, 46, 47, 49, 52, 53, 56, 72, 76, 97, 102, 289, 295, 413
 - agrosilvopastoriles, 43, 46, 47, 86, 94, 98, 463
- Socioeconomía, 40
Solución del suelo, 24, 26, 27
Sombra (árboles de), 46, 47, 49, 57, 68, 69, 232, 239, 354
Sostenibilidad, 40, 41
Surinam, 37, 91, 188, 436

T

- Tailandia, 60, 80, 81
Tala de bosques, 38, 205, 295, 327, 404, 439
Taungya, 47, 52, 60, 288
Temperatura, 3, 4, 5, 6, 58, 88, 118, 122, 174
Tenencia de la tierra, 38, 60
Textura del suelo, 123, 128
Trinidad, 65, 210
Tubérculos (véase índice de especies), 31, 77

U

- Uganda, 135, 210

V

- Venezuela, 38, 69, 91, 129, 133, 134, 135, 158, 177, 180, 181, 186, 188, 191, 192, 197, 201, 225, 238, 319, 321, 352, 396, 422, 436
Vientos, 3, 4, 58, 133

Z

- Zaire, 151, 201, 221

Publicación del Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ editada por INFORAT

Coordinadora de INFORAT : Claudia Monge

Editor : E.Hidalgo de Caviedes

Revisión bibliográfica : Carlos E. Granados M.

Levantado de texto e
impresión en láser : Lilliam Ugalde de Brenes
Rosaura Solano de Ramírez
Grace Ortega de Castro

Confección de portada y
montaje de artes gráficas : Ana Loaiza

Dibujos : Emilio Ortíz

Impreso en los talleres
gráficos de la Unidad de
Medios del CATIE : Miguel Cerdas

Edición de 1000 ejemplares

Se terminó de imprimir en el mes de abril de 1993

ERRATA

PAGINA LINEA	DICE	DEBE DECIR
167	$\begin{array}{c} \text{R} - \text{CH}_2 - \text{COOH} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{R} - \text{CH} - \text{COOH} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array}$
168	dto	dto
192	Vegetación Mantillo Suelo	Vegetación % Mantillo % Suelo %
196	(13 porciento)	(73 porciento)
201	Klinge (100)	Klinge (110)
202	(7,0 t.ha -1.a-1)	(7,0 t.ha ⁻¹ .a ⁻¹)
	(38,0 t.ha -1.a-1)	(38,0 t.ha ⁻¹ .a ⁻¹)
209	1 2 3 CIC (meq. 100 g ⁻¹) (Figura 4.6)	10 20 30