

SUELOS Y ECOSISTEMAS FORESTALES

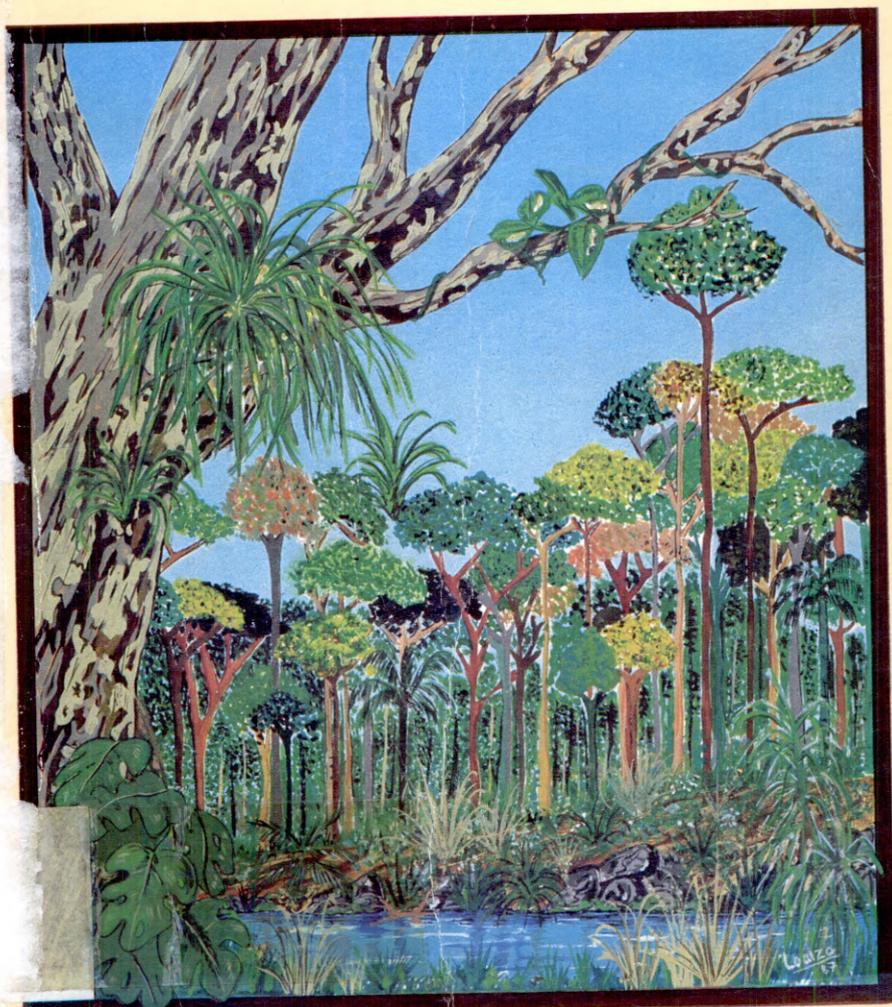
G. DE LAS SALAS

IICA

SUELOS Y ECOSISTEMAS FORESTALES

CON ÉNFASIS EN AMÉRICA TROPICAL

GONZALO DE LAS SALAS



NOS DE BIBLIOTECA

SUELOS Y ECOSISTEMAS FORESTALES

CON ÉNFASIS EN AMÉRICA TROPICAL

GONZALO DE LAS SALAS

Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
San José, Costa Rica - 1987

© Gonzalo De las Salas

© para esta primera edición, IICA, 1987.

Prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin autorización del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

Diseño de cubierta	Mario Loaiza
Composición de texto	Edit. Porvenir, S.A.
Producción editorial	Rodolfo S. Cedeño
Editor de la obra	Víctor Flury C.
Editor de la colección	Michael J. Snarskis

IICA

LIME-80 Salas, G. De las

Suelos y ecosistemas forestales ; con énfasis en América Tropical / Gonzalo De las Salas. – San José, Costa Rica ; IICA, 1987.

XVIII, 450 p. – (Colección Libros y Materiales Educativos / IICA ; No. 80).

ISBN 92 9039 123 5

1. Suelos forestales. I. Salas, G. De las. II. Título. III. Serie.

AGRIS
P30

DEWEY
631-4



Colección de Libros y Materiales Educativos No. 80

Este libro fue publicado por el Servicio Editorial del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). La Colección Libros y Materiales Educativos tiene como fin contribuir al desarrollo agrícola en las Américas.

San José, Costa Rica, 1987

A mi esposa Mireya

A nuestras hijas

Ximena Beatríz y Clarissa

AGRADECIMIENTOS

La realización de esta obra se debe en mucho al estímulo del Comité Asesor de la Serie de Libros y Materiales de Enseñanza del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Sea éste el lugar para expresarle mis agradecimientos, especialmente al Dr. Gerardo Budowski. Hago extensivos los mismos al Licenciado Julio Escoto, por su constante interés en este libro.

Agradezco al Profesor Elemer Bornemisza, Universidad de Costa Rica, su amable colaboración en la revisión del capítulo sobre materia orgánica, el cual preparé para mis cursos en el CATIE.

Estoy en deuda con aquellas personas que en una u otra forma, ayudaron al enriquecimiento del texto a través de discusiones o poniendo a mi disposición valioso material. Entre ellas, merecen mención el Dr. H.C. von

Christen, quien me inició en estas disciplinas; el Profesor H. W. Fassbender, Escuela Técnica Forestal, Göttingen, Alemania Federal y el Dr. W. Grimm, quienes generosamente me enviaron separatas de sus investigaciones ecológicas en Venezuela, publicadas en la Revista Turrialba. Lo propio debo agradecer al Profesor J.J. Ewel de la Universidad de Florida, EUA, por sus valiosos datos sobre el impacto de la quema en el ecosistema, publicados en Ecology.

De las lecciones sobre Ecosistemas Forestales del Profesor B. Ulrich, Universidad de Göttingen, aproveché algunos cuadros y valiosos conceptos, los cuales recibí de primera mano cuando tuve el privilegio de contarme entre sus estudiantes.

*Agradezco de manera muy especial a las casas editoras y a las instituciones que generosamente autorizaron la reproducción de figuras, cuadros y datos. Estas son: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA); Blackwell Scientific Publications LTD; Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO); John Wiley & Sons, Nueva York; Holt Rinehart and Winston Inc. (especialmente por la reproducción de la Fig. 7.3); Cambridge University Press, por la autorización de la reproducción de la Fig. 17 del libro de Pereira **Land Use and Water Resources**; Elsevier Scientific Publications Company.*

Hago extensivos mis agradecimientos al Profesor J.P. Veillón del Instituto de Silvicultura de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela, por permitirme utilizar sus valiosos datos de crecimiento de bosques naturales tropicales, recogidos por él durante más de veinte años. Igualmente al Sr. Manuel Chavarría, CONICIT, San José, Costa Rica, por autorizarme la reproducción de una figura del Simposio Internacional sobre las Cien-

cias Forestales y su contribución al desarrollo de la América Tropical. Mis reconocimientos al Sr. P. Werner, por permitirme utilizar datos preliminares de su tesis doctoral.

La reproducción de la Fig. 37 sobre el Sistema Integrado de Producción Estratificada (SIPE) debo agradecerla al Profesor J. Dubois, con quien tuve la oportunidad de discutir puntos de vista sobre la utilización de los recursos de los trópicos húmedos.

Algunos datos originales del libro son también esfuerzos compartidos con el Profesor H. Foelster, Universidad de Göttingen. Otros datos reportados en el libro corresponden a los trabajos de investigación de estudiantes graduados del Programa de Recursos Naturales Renovables del CATIE, en Turrialba, Costa Rica, a quienes tuve oportunidad de orientar o dirigir. Son ellos, especialmente: Cecilio Estribí, Panamá; Walter Apolo, Ecuador, y Mauricio Bermúdez, Costa Rica, a quienes expreso mi agradecimiento.

El tema sobre la actividad ganadera en el trópico húmedo estuvo enriquecido con las discusiones y el aporte del Dr. Manuel Ruiz, Nutricionista Animal del IICA. Sea éste el lugar para agradecer su valiosa colaboración.

Agradezco sinceramente al Dr. Armando Samper Gnecco, Director del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, por aceptar prologar esta obra.

No deseo terminar sin hacer un justo reconocimiento a la señorita Ana Georgina Vargas, por la eficiente labor de mecanografía del manuscrito y al señor Jorge E. Adames por la confección de las figuras y cuadros.

CONTENIDO

	Página
Agradecimientos	i
Índice de cuadros y figuras	vii
Prólogo	xiii
Prefacio	xvii

PARTE I

El suelo como componente del medio: relaciones suelo-clima-vegetación	7
CAPITULO 1. Factores climáticos	9
CAPITULO 2. Factores edáficos	23
CAPITULO 3. Factores vegetales	49
CAPITULO 4. Asociaciones climaedafozonales de la vegetación en América Tropical	65

PARTE II

El ecosistema forestal	85
CAPITULO 5. El concepto de ecosistema	87
CAPITULO 6. Descripción estática del ecosistema forestal .	97
CAPITULO 7. Descripción dinámica del ecosistema	111
CAPITULO 8. La materia orgánica del suelo	123
CAPITULO 9. Ciclo de elementos químicos	159
CAPITULO 10. Ecosistemas forestales de América Tropical .	191

PARTE III

El suelo como componente del sistema de producción	229
CAPITULO 11. Agricultura de baja tecnología: agricultura migratoria y de ladera	231
CAPITULO 12. El suelo bajo producción pastoril y agrosilvopastoril	265
CAPITULO 13. El suelo bajo producción forestal	319
CAPITULO 14. El suelo y el manejo de cuencas hidrográficas	405
CAPITULO 15. El uso de la tierra y la toma de decisiones ..	431

Índice de Cuadros y Figuras

Cuadro		Página
1	Distribución de las principales regiones climáticas de los trópicos	16
2	Valores límite de precipitación anual, meses húmedos y temperaturas que caracterizan los climas ambientales extremos en los Andes Inter-tropicales	17
3	Principales procesos de formación de suelos	26
4	Principales organismos del suelo y su función	35
5	Elementos formativos básicos de los nombres de los órdenes de la clasificación americana de suelos	41
6	Número de individuos por hectárea en diferentes bosques lluviosos tropicales	53
7	Número de especies por hectárea en bosques lluviosos tropicales mixtos (<i>mixed tropical rain forest</i>)	53
8	Datos de crecimiento de parcelas dinámicas de tipos de bosque natural de Venezuela	55
9	Productividad de algunos bosques naturales tropicales	56
10	Crecimiento medio anual en diámetro de algunos bosques y especies tropicales americanas	57
11	Vegetación arbustiva característica de maleza desértica y matorral espinoso en América Tropical	66
12	Distribución del volumen maderable como dependiente del sitio con reservas nutricionales, para comparación (ecosistema de bosque nublado de La Carbonera, Venezuela)	76
13	Fitomasa de diferentes sistemas agroforestales en América Tropical . . .	102
14	Reservas minerales de algunos ecosistemas forestales tropicales	104
15	Producción de hojarasca (t/ha/año) y transferencia de elementos químicos (kg/ha/año) con los residuos vegetales en algunos ecosistemas forestales americanos	113
16	Tasas de transferencia de nutrimentos dentro de los compartimientos del ecosistema forestal amazónico de Caatinga, Venezuela (kg/ha/año) . .	119
17	Distribución típica de microorganismos (en 1000/g suelo) en un perfil de suelo mineral	130
18	Producción anual de hojarasca y aporte de nutrimentos al suelo en algunos bosques tropicales nativos	141

Cuadro	Página
19	Características químicas de los tres tipos de humus más importantes . . . 145
20	Descomposición del humus en sitios de bosque y sabana tropical por agricultura nómada y cultivo 146
21	Descomposición del humus 147
22	Reservas de nitrógeno (kg/ha) y transferencias (kg/ha/año) en dos ecosistemas forestales y uno agroforestal 163
23	Estimativos de campo de la capacidad de fijación del N ₂ por algunas especies arbóreas en el trópico 167
24	Distribución de C, N y S en el bosque, la roza (material de 11 semanas) y después de una quema experimental en un ecosistema húmedo tropical 180
25	Algunos bienes del bosque natural del trópico húmedo americano 192
26	Características sobresalientes de algunos ecosistemas de bosque en el trópico americano 197
27	Distribución de los suelos del trópico americano 197
28	Contribución de especies de fauna a la alimentación rural en la Amazonía peruana 200
29	Estratificación del bosque lluvioso de "tierra firme" 201
30	Características dasométricas del bosque de San Carlos de Río Negro . . . 203
31	Composición florística y fitomasa de la alta y baja caatinga amazónica en San Carlos de Río Negro, Venezuela 204
32	Distribución y dominancia de las especies más representativas del bosque de selva densa, Amazonas, Colombia 206
33	Características dasométricas del bosque amazónico colombiano 206
34	Dominancia de especies del bosque primario de terraza Carare-Opón, Colombia 208
35	Características dasométricas del bosque primario del Carare-Opón, Colombia 209
36	Caracterización climática del Cerrado del Brasil en seis localidades representativas 210
37	Producción de madera de tres tipos de cerrado y un bosque húmedo . . . 210
38	Principales tipos de sabanas en los Llanos Orientales, Colombia 213
39	Distribución de especies y características dasométricas del bosque de sabana inundable de dos estratos. 215
40	Características dasométricas del Bosque de San Eusebio, Andes venezolanos 217
41	Volúmenes maderables por tipo de bosque y categoría diamétrica en la Selva Central del Perú 219
42	Efectos de los sistemas de desmonte en la producción de cultivos y cambios en los 50 cm superiores en un Entisol de Santa Cruz, Bolivia . . . 239
43	Cambios en algunas propiedades químicas del suelo superior antes y después de la quema del bosque en la Amazonía, Costa Rica y Colombia 240
44	Influencia del ciclo de nutrimentos en sistemas agroforestales tropicales 244

Cuadro		Página
45	Propiedades del suelo superficial (0-10 cm) de terrenos seleccionados por caboclos y colonos cerca de Altamira, Brasil	245
46	Reserva de bioelementos (kg/ha) en el suelo mineral (0.5 cm) de rastrojos en el valle medio del Magdalena, Colombia y la Selva, Costa Rica	247
47	Superficie total, superficie y población en las zonas de ladera de América Tropical	249
48	Clasificación de suelos de ladera y altiplanos de América Tropical	250
49	Distribución de la calidad de suelos por países en las laderas y altiplanos de América Tropical	252
50	Participación estimada de la producción de ladera de algunos cultivos en la Región Andina	253
51	Escoorrentía y tasas de erosión bajo diferentes coberturas	254
52	Tasa de erosión del suelo en el trópico húmedo según el tipo de vegetación	254
53	Distribución topográfica de los principales suelos de la Cuenca Amazónica	267
54	Principales limitaciones de los suelos amazónicos bajo vegetación natural	268
55	Pérdidas totales de suelo en 32 meses con diferentes cultivos y sistemas de manejo en Caquetá, Colombia	269
56	Comparación de opciones de uso para la "tierra firme" de la Amazonía brasilera	274
57	Funciones del componente forestal en los sistemas agrosilvopastoriles	281
58	Costo y beneficio anual de naranjos con dos años, maíz y yuca con tecnología intermedia en Honduras	283
59	Costo de inversión y beneficio para una hectárea de plantación de <i>Cordia alliodora</i> asociada con cultivos en Suriname	284
60	Esquema de clasificación de las técnicas agroforestales	285
61	Producción de pasto bajo árboles leguminosos y no leguminosos	289
62	Distribución de <i>Cordia alliodora</i> establecida por regeneración natural asociada con cultivos agrícolas en los neotrópicos húmedos	292
63	Árboles forrajeros con beneficios subsidiarios para sistemas agroforestales	294
64	Status nutricional del suelo bajo algunos bosques naturales de América Tropical	320
65	Nutrientes inmovilizados en el bosque y en la capa de humus	338
66	Nutrientes inmovilizados (kg/ha) en la biomasa y en el <i>litter</i> de plantaciones forestales tropicales	340
67	Demanda anual promedio de nutrientes en algunas especies tropicales	342
68	Circulación anual y total de nutrientes, capital y remoción en rodales de <i>Pinus patula</i> y <i>Cupressus lusitanica</i> en Tanzania durante una rotación de 30 años	342
69	Propiedades edáficas frecuentemente asociadas a la productividad del sitio en plantaciones forestales del trópico	354
70	Elementos esenciales para las plantas	362

Cuadro		Página
71	Contenido de C y N en algunos suelos de América	364
72	Distribución de las fracciones de fósforo total en la capa arable de algunos suelos latinoamericanos	366
73	Concentración aproximada de micronutrientes en las hojas de plantas maduras	373
74	Fuentes de nitrógeno, fósforo, potasio y boro y sus condiciones de uso como fertilizantes	377
75	Resultados de algunos ensayos de fertilización de plantaciones forestales en el trópico	380
76	Efectos de la entresaca sobre las tasas de transferencia de N en una plantación de teca de 25 años en Nigeria	382
77	Flujos hidrológicos de algunos ecosistemas de bosque	409
78	Capacidad de infiltración del suelo bajo diferentes coberturas vegetales	412
79	Escorrentía y tasas de erosión bajo diferentes coberturas vegetales . . .	420
80	Valores de intercepción de lluvia para diferentes bosques tropicales . . .	422
81	Distribución de los suelos potencialmente utilizables en la región central de América Tropical	437
82	Factores sugeridos para la identificación de tierras aptas para la ganadería	441

FIGURAS

Fig.		Página
1	Gradientes de humedad de ecosistemas naturales en la tierra baja tropical del Perú y Ecuador	15
2	Diagrama para la clasificación de formaciones vegetales del mundo . . .	18
3	Suelo de la Región de Anchicayá, Colombia	29
4	Mosaico de deyecciones de organismos edáficos descomponedores de materia orgánica	34
5	Presentación gráfica de una endomicorriza	39
6	Micorriza del tipo coraloide simple formada por <i>Telephora terrestris</i> en raíces de plántulas de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	39
7	Perfil de vegetación Sta Julia - Igara-Paraná, Amazonía, Colombia. Tipo de Bosque B _{II} (terrazas)	52
8	Distribución de la vegetación a través de un gradiente edáfico	72
9	Balace hídrico y variación de la humedad del suelo en función de la altitud para cuatro tipos de bosque. Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia	78
10	El ecosistema forestal y sus componentes	89
11	Esquema simplificado de la estructura de un ecosistema forestal con compartimientos, reservas (R) y flujos (F)	92

Fig.		Página
12	Reservas orgánicas de algunos ecosistemas boscosos de América Tropical	103
13	Un diagrama simplificado del flujo energético en una cadena alimenticia	112
14	Producción anual de hojarasca (leaf litter) en diferentes ecosistemas forestales americanos y su tasa de descomposición	114
15	Representación estructural de un bosque nativo altoandino, con indicación de los flujos de agua	116
16	Transformación de la materia orgánica	126
17	Principio de la humificación biológica	128
18	Circulación de la materia orgánica en el suelo	132
19	Contenido de humus y tasas relativas de producción/descomposición de materia orgánica como función de la altitud s.n.m.	134
20	Reservas (g/m^2) y transferencias ($\text{g/m}^2/\text{año}$) de nitrógeno dentro del sistema global planta-suelo	161
21	Modelo del ciclo del nitrógeno en un ecosistema forestal montano . . .	162
22	Representación esquemática de los procesos de abastecimiento, pérdida y uso del nitrógeno del suelo	164
23	Ciclo del fósforo en los suelos	173
24	Modelo del ciclo del potasio en un Rodal de <i>P. rospigliosii</i> , San Eusebio, Venezuela	176
25	Esquema del ciclo del potasio en el suelo	178
26	Caracterización de la producción en sistemas de tumba-roza-quema . . .	232
27	Niveles de materia orgánica del suelo mineral (0-10 cm) en el bosque del Carare, valle del Magdalena, Colombia	237
28	Representación teórica de los cambios en carbono orgánico del suelo a los 30 cm superiores por efecto de la razón cultivo: barbecho	238
29	Modelo de las tendencias probables en la fertilidad del suelo por cambio de bosque a pastos	242
30	Maíz chococito, sembrado entre el rastrojo, Bajo Calima, Colombia . . .	243
31	Algunos ejemplos de sistemas agrosilvopastoriles	276
32	Algunos ejemplos de sistemas agrosilvícolas	278
33	Algunos ejemplos de sistemas silvopastoriles	279
34	Esquema de clasificación del uso de la tierra e impacto de las técnicas agroforestales	282
35	Estructura vertical típica en combinaciones de café-árboles de sombra en zonas cafeteras de América Tropical	287
36	Sistema Integrado de Producción Estratificada (SIPE)	296
37	Relación entre el número de árboles y la disponibilidad de nutrientes del suelo en 46 áreas forestales en Costa Rica	322
38	Interrelaciones entre el suelo y la vegetación en un ecosistema vegetal .	329
39	Índice de rendimiento de teca (<i>Tectona grandis</i>) en Togo, África Tropical	347

Fig.		Página
40	Un modelo para agrupar sitios según características edáficas, fisiográficas y climáticas	349
41	Modelo estadístico generalmente usado en los estudios de clasificación de índices de sitio	350
42	El ciclo hidrológico	406
43	Ciclo general y global anual del agua	408
44	Nomenclatura más común en una cuenca	410
45	Balance hídrico de una cuenca	411
46	Precipitación y tasa de consumo de agua (Et/Eo) de un bosque y una plantación de te en Kericho, Africa del Este	416
47	Flujograma de estudios de prefactibilidad y factibilidad para la planificación del uso del agua en una cuenca	423

PROLOGO

El Doctor Gonzalo De las Salas ha hecho el esfuerzo de recoger y resumir en este libro su vasta experiencia y conocimientos como profesor, investigador y consultor en el campo de los suelos y los ecosistemas forestales, tema que domina ampliamente. Su obra hace énfasis en América Tropical.

En la primera parte, analiza el suelo como componente del medio y las relaciones entre suelo, clima y vegetación, incluyendo los factores climáticos, los factores edáficos, los factores vegetales y las asociaciones climaedafozonales de la vegetación en América Tropical.

En la segunda parte, estudia el ecosistema forestal, tanto desde el punto de vista de la estática como de la dinámica del sistema, incluyendo un análisis de la materia orgánica del suelo y del ciclo de elementos químicos. Concluye esa parte del libro con una descripción de los principales ecosistemas forestales de América Latina, tales como la Amazonía Central del Brasil, el ecosistema amazónico de Venezuela, la Amazonía colombiana, el bosque húmedo tropical del Carare-Opón en Colombia, los Ecosistemas de Sabana, el Campo Cerrado del Brasil, los Llanos Orientales de Colombia, los ecosistemas motanos, la Selva Central del Perú y otros ecosistemas.

En la tercera parte, analiza el suelo como componente del sistema de producción. Estudia la agricultura de baja tecnología, tanto la migratoria como la de ladera. Luego analiza el suelo bajo producción pastoril y agrosilvopastoril. A continuación, describe la utilización del suelo en la producción forestal y en el manejo de cuencas hidrográficas. Concluye con un importante capítulo sobre el uso de la tierra y la toma de

decisiones, en el cual analiza, entre otros temas, la justificación ecológica de los patrones actuales del uso de la tierra en el trópico, los errores que cuestan, las pautas que deben seguirse y las perspectivas existentes. El autor asume una posición ponderada, entre los pronósticos terroristas de los arúspices del desastre y los que miran con optimismo el futuro, entre la población en constante crecimiento y las limitaciones de los recursos ecológicos. Alabo tal posición del doctor de las Salas, ya que siempre he creído en la capacidad creadora del hombre y su utilización inteligente de la razón, para hacerle frente con éxito al reto de nuestro tiempo, esto es, aprovechar racionalmente los recursos naturales para su propio bienestar, sin destruirlos.

El doctor Gonzalo De las Salas es un distinguido Ingeniero Forestal egresado de la Universidad Distrital "Francisco José de Caldas", de Bogotá, en 1963. Siguió estudios de post-grado sobre suelos, ecología y uso de la tierra en la Universidad Göttingen, en Alemania Federal, donde obtuvo en 1973 el título de doctor en ciencias forestales.

Durante varios años fue profesor de suelos y utilización de la tierra en la Universidad Distrital de Bogotá. Entre 1979 y 1981 fue profesor de post-grado en suelos, con particular énfasis en las bases ecológicas para el uso de la tierra, del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) de la Universidad de Costa Rica, en Turrialba.

De 1976 a 1979 fue Jefe de Investigaciones de la Corporación Nacional de Investigaciones Forestales (CONIF) con sede en Bogotá, Colombia. Tiene una lujosa hoja de vida como consultor internacional en asuntos de suelos, relación suelo-planta, uso de la tierra, manejo de cuencas hidrográficas y ecología. Es autor de numerosas publicaciones científicas.

Por haber tenido el privilegio de contar con sus servicios como Jefe de Investigaciones, cuando fui Presidente de CONIF, y haber seguido de cerca su carrera profesional, en mi calidad de Director General del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), en el período 1960-69, me complace que haya culminado con éxito el esfuerzo que realizó durante varios meses el doctor de las Salas,

para escribir esta obra que llena un vacío importante; en lo referente a los suelos y ecosistemas forestales en América Tropical y me complace, por cierto, que el IICA lo haya incluido en la ya extensa serie de textos y manuales de enseñanza que me tocó iniciar como Director General hace ya un buen número de años.

Armando Samper Gnecco

PREFACIO

La idea de este libro surgió cuando me encontraba como Silvicultor y Especialista en Suelos Forestales, en el Departamento de Recursos Naturales Renovables del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica, durante los años 1979 y 1980.

*La importancia del suelo como componente básico de disciplinas forestales ha sido reconocida, desde hace mucho tiempo, en los países de las zonas templadas, y sólo recientemente en los trópicos. En el siglo pasado ya se interesaron los Forestales de Europa por resolver los problemas del suelo como factor de sitio para árboles. Cajander fue uno de los pioneros de la edafología forestal en Europa; y sus escritos cobran actualidad, toda vez que las relaciones nutricionales entre el suelo y la planta —y la influencia edáfica sobre el crecimiento de los árboles— no se han aclarado suficientemente, sobre todo en los trópicos. Es sorprendente constatar el hecho de que un libro escrito en el siglo XIX por Ebermayer, titulado *Die Gesamtlehre der Waldstreu* (algo así como: *El mundo de la capa orgánica del bosque*), tenga todavía actualidad. Así lo expresó el Profesor de la Universidad de Cornell, EUA, Dr. E.L. Stone en un Simposio en Syracuse, Nueva York, en agosto de 1979.*

La pedología forestal es una rama de la pedología aplicada e investiga las relaciones entre el suelo y las poblaciones forestales que éste soporta. Tal ciencia tiene ya amplia utilización en la zona templada y en algunas repoblaciones de teca, okoumé, limba y eucalipto, en Africa Tropical. En el trópico americano se conoce muy poco sobre las exigencias edáficas de las especies forestales y la información existente se encuentra muy dispersa.

La presente obra no pretende ser un libro "clásico" de suelos, pues ya existen bastantes, algunos de ellos de una excelencia científica encomiable. Intenta ser más bien un texto de enseñanza y consulta en un campo específico de los recursos naturales renovables.

El suelo se destaca aquí como componente del ecosistema forestal y se analiza su aplicación en el manejo de las plantaciones. El libro describe el suelo forestal como centro de actividad biológica y almacén de nutrimentos, a la vez que evalúa la influencia de la cobertura forestal sobre un ámbito más amplio, cual es el régimen hídrico de las cuencas hidrográficas.

Por tener en cuenta que los bosques de los trópicos americanos están sometidos a procesos intensos de deforestación, he creído conveniente dedicarle un espacio, abarcado por los Caps. 11 y 12, a la problemática del uso del suelo bajo agricultura migratoria, pastos y sistemas agrosilvopastoriles.

El libro consta de tres partes: 1. El suelo como componente del medio (Caps. 1 a 4). 2. El ecosistema forestal (Caps. 5 a 10) y 3. El suelo como parte del sistema de producción (Caps. 11 a 14). El último capítulo (15) representa un corolario de todos los anteriores y se titula: El uso de la tierra y la toma de decisiones.

Las deficiencias de la obra, en cuanto a la profundidad de los temas tratados y ámbitos geográficos tropicales americanos no tocados, debe servir de estímulo a los investigadores para que aporten el valioso concurso de sus experiencias, contribuyendo a mejorar el acervo informativo sobre el trópico americano y a delinear pautas que optimicen el uso de los recursos naturales renovables.

El autor se sentiría más que satisfecho, si esta modesta obra fuera útil en la formación de los futuros profesionales que egresan cada año de las facultades de Agronomía, Ciencias Forestales y campos afines, del Trópico Americano.

Bogotá, 1987

Gonzalo De las Salas

PARTE I

**EL SUELO
COMO COMPONENTE
DEL MEDIO:**

**RELACIONES
SUELO - CLIMA - VEGETACION**

FACTORES CLIMATICOS

La excelente obra *Condiciones del Suelo y Crecimiento de las Plantas*, de Sir E. John Russell, presenta una lista de los factores climáticos más importantes que modifican el crecimiento de las plantas. Tales factores son: temperatura, corrientes de aire, humedad, luz. En la mayoría de los casos, estos factores se interrelacionan; en efecto, la influencia del clima sobre la vegetación se ejerce en forma directa (temperatura, luz, humedad relativa, vientos, entre otros); o indirecta, sobre el suelo. El papel que juega el suelo se refiere al agua y al aire en primer lugar y también a los bio-elementos.

El suelo suministra a la vegetación —bajo las condiciones reinantes del clima— los nutrimentos necesarios para su función. El *status* nutricional del suelo condiciona, en la mayoría de los casos, sitios especiales. La relación clima-suelo-vegetación ha sido destacada en el enfoque de varios autores que tratan el suelo como un componente del ecosistema. El mismo enfoque se pone de manifiesto en este capítulo y en los siguientes.

Aunque la definición de los parámetros climáticos que rigen los fenómenos atmosféricos en el trópico es propia de los libros de climatología, vale la pena recordar que existe en su medio un sistema de circulación intertropical (ITC), dentro de las circulaciones atmosféricas globales. Esto le imprime al clima tropical una característica especial: perturbaciones atmosféricas, vientos alisios húmedos, precipitaciones muy variadas y otros fenómenos que influyen decisivamente en la fisionomía y el comportamiento de la vegetación y en la evolución del suelo.

Temperatura

Uno de los factores que más influye en el desarrollo del suelo es la temperatura. Dentro de cierto ámbito y naturalmente en presencia de agua, los aumentos en la temperatura causan también un incremento en la velocidad de reacción, es decir, en los procesos de meteorización química del suelo. En términos generales se acepta que los aumentos en la temperatura ambiente implican (Alvarado¹; Buol *et al*³):

- mayor profundidad del suelo;
- mayor lavado de bases (al favorecer la desintegración de las rocas);
- menor relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ al acumularse el aluminio en zonas húmedas;
- acumulación de sales en regiones áridas;
- colores más rojos por acumulación de hierro en regiones húmedas;
- mayor mineralización de la materia orgánica si la humedad no es limitativa;
- mayor cantidad de arcillas.

La temperatura influye sustancialmente en el incremento o disminución de la materia orgánica del suelo superior, y su tasa de descomposición disminuye con la altitud y aumenta hacia la región tropical (ver Cap. 8). Los efectos de la temperatura y de la precipitación son difíciles de separar, por lo que en este mismo capítulo deben considerarse en forma conjunta.

En un sentido global, la influencia de la temperatura sobre el desarrollo de la vegetación se mide generalmente como un índice del balance calórico y se refiere a la temperatura promedio anual del sitio en cuestión. Esa temperatura media anual es una función de la latitud y altitud del lugar. Como una indicación muy generalizada, se

puede utilizar, para el nivel del mar, un gradiente térmico meridional de 1°C a 2°C por cada 10°C de latitud, cifra que disminuye desde el ecuador climático hacia los subtrópicos (Trojer¹⁵). Para el gradiente vertical promedio se calcula, en todas las zonas tropicales, de 0.6 a 0.7°C por cada 100 metros. Los niveles isotérmicos para cada latitud y altitud se representan generalmente en mapas climatológicos, que sirven de base para estudios potenciales del uso de la tierra. La temperatura promedio anual se tiene en cuenta también para calcular los meses secos y húmedos en el transcurso del año. Holdridge⁸ utiliza el parámetro calor, como sinónimo de temperatura para sus cálculos de biotemperatura, en su clasificación de Zonas de Vida. En efecto, comenta que la temperatura, resultado de la radiación solar y de los movimientos de la atmósfera en un punto dado, se mide por la dilatación y contracción de una columna de mercurio, incluida en un tubo de vidrio cerrado y calibrado, llamado termómetro. Este es el método más simple y práctico para medir el factor calor, que es uno de los requisitos principales para que exista la vida y se desarrollen los procesos vitales. Opina, además, que en su clasificación ha seleccionado la vegetación como el factor principal para medir los efectos de la temperatura, porque la vida vegetal es la base esencial de la cual depende la vida animal, a pesar de que los animales, especialmente algunos mamíferos superiores, no se hallan tan limitados por la temperatura.

La biotemperatura anual promedio es la medida del calor utilizada en el diagrama de las Zonas de Vida. Este parámetro corresponde a un promedio de las temperaturas en grados centígrados, en las cuales tiene lugar el crecimiento vegetativo, relacionado con el período anual. Holdridge⁸ estima que el ámbito de las temperaturas, dentro de las que ocurre el crecimiento vegetativo, está entre 0°C como mínimo y 30°C como máximo. Para poder comparar efectivamente un punto dado con otro cualquiera, deben promediarse las temperaturas del ámbito mencionado durante todo el período anual. Debido a que algunas veces se dispone de promedios mensuales. Holdridge⁸ desarrolló una fórmula empírica, que parece ajustarse bien a la condición del clima subtropical, que consiste en convertir una temperatura promedio mensual en grados centígrados t a una biotemperatura promedio mensual t^{bio} . La fórmula es:

$$t^{bio} = t - \frac{[3 \times \text{grados de latitud}]}{100} \times (t - 24)^2$$

El autor citado anota: “es de esperar que, cuando se aprecie la importancia que tiene la biotemperatura para la agricultura y para el manejo de otros recursos naturales, las estaciones meteorológicas se vean inducidas a calcular y publicar valores de biotemperatura, junto con los promedios usuales de temperatura. Mientras se llega a esta situación, será necesario continuar con las investigaciones fisiológicas y ecológicas, para determinar un valor más exacto del tope máximo de la temperatura”.

Precipitación

La precipitación es otro de los factores fundamentales que influyen sobre el desarrollo del suelo y sobre la fisionomía de la vegetación. Este valor también es usado por Holdridge⁸, para construir su diagrama de Zonas de Vida. Se define como el total anual promedio de agua, en milímetros, que cae en forma de lluvia, nieve, granizo o cellisca. Generalmente se excluye el agua que se condensa directamente sobre la vegetación o el suelo, tal como el rocío, a pesar de que en algunos sitios esa humedad constituye un importante aporte al balance hídrico. Tal humedad se denomina normalmente **lluvia del bosque** o precipitación horizontal.

El régimen de actividad pluvial depende, tanto de los procesos atmosféricos de los sistemas de circulación tropical que causan la distribución latitudinal, como de la influencia que ejercen las circulaciones locales sobre la distribución regional, según las diferentes formas típicas de topografía. El nivel pluviométrico regional depende de las características de las masas de aire (temperatura, densidad, humedad absoluta y otras), comprendidas bajo el concepto **altitud relativa efectiva**. El agua precipitable está relacionada con la humedad absoluta y depende del nivel en el que las masas de aire inician el movimiento ascendente por convergencia, convección y circulación local. Influyen, además, las formas de la topografía (plana, quebrada, altitud de vertientes abruptas) sobre el grado de efectividad de los procesos que originan las precipitaciones (Trojer¹⁵).

El efecto directo de la precipitación sobre el suelo se traduce en el aumento de la escorrentía superficial, especialmente en los suelos expuestos, sin cobertura vegetal. Generalmente, se acepta que los aumentos en la precipitación y humedad implican (Alvarado¹; Buol *et al*³; Young¹⁹):

- mayor cantidad de materia orgánica y nitrógeno;
- menos concentración de sales;
- mayor o menor profundidad del horizonte cálcico (si éste existe);
- mayor concentración de cuarzo;
- reducción de la capacidad de intercambio catiónico (aumento de la formación de arcillas de tipo 1:1);
- mayor acidez;
- mayor cantidad de arcilla.

En las montañas tropicales y subtropicales existe una marcada correlación entre la precipitación (y por consiguiente, la humedad) y la fisionomía de la vegetación (ver Fig. 9, Cap. 4). Se conoce universalmente que, con precipitaciones continuas durante todo el año, los suelos lateríticos muy lavados de las tierras bajas intergradan hacia suelos húmicos ferralíticos, a altitudes de aproximadamente 1600 m, dando lugar, en algunos casos, a la formación de podsoles y suelos orgánicos, a 2000 m y más (Askew, citado por Young¹⁹). Por ser el material parental constante, los cambios en las propiedades del suelo, con respecto a la altitud, pueden establecerse en forma más o menos clara. Así, en suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia, existe un incremento en la materia orgánica y un descenso en el porcentaje de arcilla, que contiene caolinita y halloysita, así como en el grado de meteorización de los minerales primarios y en el grado de desarrollo del horizonte B, a medida que se asciende de los 1000 m de altitud (24°C) a 3700 m (8°C) (Cortés y Franzmeier⁴). Climo-secuencias similares han sido encontradas por otros autores, entre ellos Jenny⁹, en el Estado de Nuevo México, Estados Unidos.

Humedad

Este parámetro es, a menudo, confundido con la precipitación, aunque existe una correlación directa entre los dos, a lo largo de una línea de temperatura dada, dentro de una región latitudinal o de una faja latitudinal. Holdridge⁸ afirma que no es cierto que esa correlación pueda aplicarse al mundo considerado como un todo. La misma precipitación promedio anual, según el mismo autor, que da origen a un ambiente muy húmedo en la región subpolar o en la faja alpina, sólo alcanza a producir condiciones áridas cuando ocurre en las regiones bajas tropicales. La razón de este fenómeno es que la humedad del ambiente está determinada por la relación entre temperatura y precipitación, independientemente de otras fuentes de humedad. En su sistema de clasificación de Zonas de Vida, este autor

hace uso de la evapotranspiración potencial para obtener valores que definen la coordenada de humedad en su diagrama. Cabe definir la evapotranspiración potencial como la cantidad teórica de agua que podría ser cedida a la atmósfera por la cobertura natural del área, en un clima típico o zonal y en un suelo también zonal*, si existiera agua suficiente, pero no excesiva, durante toda la estación de crecimiento. Puesto que la evaporación y la transpiración están directamente correlacionadas con la temperatura, y los otros factores permanecen iguales, la evapotranspiración potencial promedio anual, de cualquier lugar, puede determinarse multiplicando la biotemperatura promedio anual por el factor 58.93. Tal parámetro fue derivado por Holdridge para su diagrama de Zonas de Vida. Este producto se toma como 100%. Existen, sin embargo, otros procedimientos para calcular la evapotranspiración potencial, sugeridos por varios autores, entre ellos, Penman y Thornthwaite¹⁴. Una discusión de estos parámetros climáticos está fuera de los objetivos de este capítulo. Se remite al lector interesado a la literatura especializada. La humedad juega un papel muy importante en la clasificación de las comunidades vegetales en los trópicos. La Fig. 1 representa series de humedad de los ecosistemas naturales, en las tierras bajas tropicales del Perú y Ecuador. La figura muestra un diagrama climático, en la parte superior, que describe el patrón anual de distribución mensual de la temperatura y la precipitación en diferentes regiones. Este diagrama se ha hecho según el método de Walter, el cual relaciona la temperatura y la precipitación así: $2T = PTP(\text{mm})$. Esto significa que un mes es seco cuando el doble de la temperatura de ese mismo mes es inferior a la precipitación.

Regiones climáticas de América Tropical

Geográficamente, los trópicos constituyen la parte del globo comprendida entre los 23.5° Norte y Sur del Ecuador. Según datos de Sánchez¹², los trópicos comprenden el 38% de la superficie terrestre (aproximadamente cinco billones de hectáreas) y el 45% de la población del mundo (alrededor de 1800 millones de habitantes). Aproximadamente 72 países y territorios están localizados totalmente o en su mayor parte en los trópicos.

* La clasificación de suelos zonales es muy antigua y se refiere principalmente a aquellos suelos en cuyo desarrollo ha influido principalmente el clima; se excluyen los suelos afectados por fenómenos distintos, como sales, depósitos aluviales, arrastres coluviales y otros.

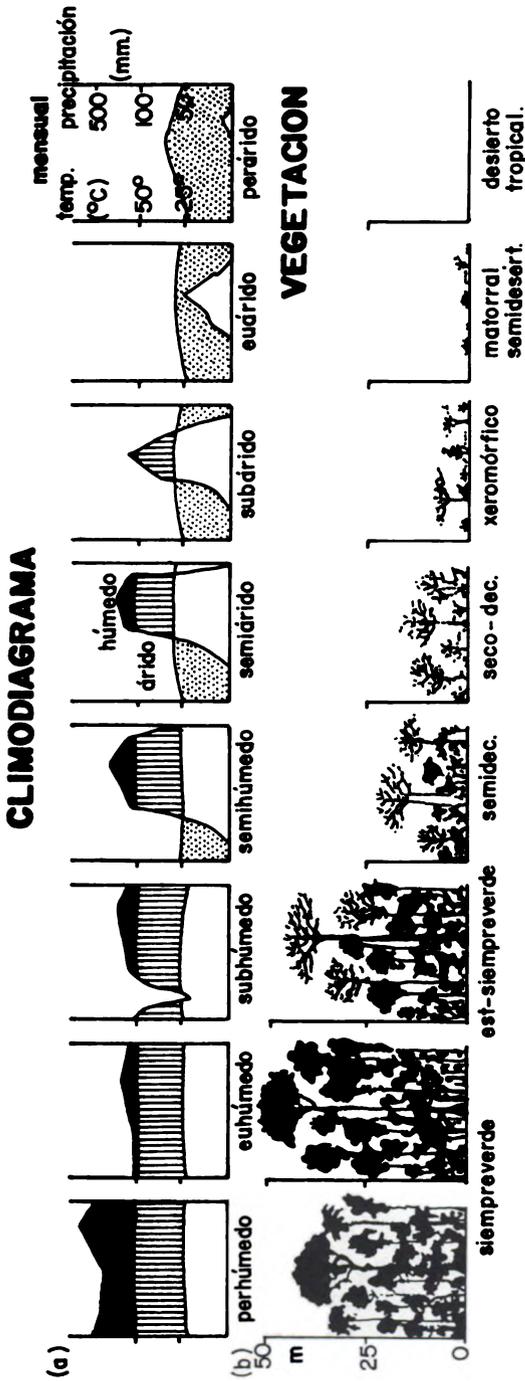


FIG. 1. Gradientes de humedad de ecosistemas naturales en la tierra baja tropical del Perú y Ecuador. a) Climodiagrama que muestra el patrón anual de temperatura y precipitación en diferentes regiones. b) Perfiles generalizados de vegetación.

FUENTE: Eilenberg⁵. Reproducido con permiso de Blackwell Scientific Publications Ltd.

Las principales características fisiográficas de las regiones tropicales americanas son la cordillera de los Andes y sus prolongaciones en América Central y en México, los escudos de la Guyana y Brasil, las Cuencas del Orinoco, del Amazonas y del Paraná y las islas del Caribe. Los Andes estuvieron sometidos a un proceso intenso de vulcanismo después de su emergencia del mar. Los escudos de las Guyanas se componen principalmente de basamentos cristalinos, de edad muy antigua, probablemente del período precámbrico. Las rocas son principalmente granitos, neises y mica-esquistos (Sombrøek¹³). La cuenca del Orinoco está separada de la del Amazonas por las tierras altas de la Guyana. Ambas áreas están cubiertas por depósitos del período terciario, con bandas de aluvión reciente. La cuenca del Paraná, al sur, es rica en depósitos de basalto (Sánchez¹²).

El Cuadro 1 ilustra la distribución de las principales regiones climáticas de los trópicos.

CUADRO 1: Distribución de las principales regiones climáticas de los trópicos, con base en la clasificación de Landesberg-Troll (millones de hectáreas. Adaptado del President's Science Advisory Committee, 1967).

Clima	Meses Húmedos	Vegetación Predominante	América Tropical	África Tropical	Asia Tropical	Total	%
Lluvioso	9.5-12	Bosque pluvial	646	197	348	1191	24
Estacional	4.5-9.5	Sabana o bosque decíduo	802	1144	484	2430	49
Seco	2 -4.5	Arbustos y árboles espinosos	84	486	201	771	16
Desierto	0 -2	Matorral y desértico y semidesértico	25	304	229	558	11
Total			1557	2131	1262	4950	100

FUENTE: Sánchez¹². Reproducido con permiso del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

Otros intentos para clasificar los climas tropicales merecen mencionarse: los estudios de Joseph y Williams¹⁸ para el Suroeste Asiático y África Tropical; Thornthwaite¹⁴, Troll¹⁷, Lauer¹¹, Trojer¹⁵ Koeppen¹⁰ y Guhl⁶, entre los principales.

Para los Andes intertropicales, Guhl⁶ presenta una clasificación que relaciona la precipitación anual, los meses húmedos y las temperaturas características de los climas ambientales extremos. Este enfoque se presenta en el Cuadro 2.

CUADRO 2: Valores límite de precipitación anual, meses húmedos y temperaturas que caracterizan los climas ambientales extremos^{1/} en los Andes Intertropicales.

Tipos de Clima Ambiental	Pisos Extremos	Extremos de Precipitación y Temperatura	
Super-Húmedo y Muy Húmedo ^{2/} 11 a 12 meses húmedos	Páramo Bajo Vertientes Tierra Caliente	> 1500 mm > 5000 mm	< 12°C > 24°C
Húmedo 9 a 11 meses húmedos	Páramo Alto Tierra Caliente	< 1500 mm < 5000 mm	< 12°C > 24°C
Semi-Húmedo 7 a 9 meses húmedos	Páramo Interandino Tierra Caliente	< 800 mm < 2500 mm	< 12°C > 24°C
Semi-Arido 4 a 7 meses húmedos	Puna Húmeda ^{3/} (no existe en Colombia) Tierra Caliente	< 500 mm < 1500 mm	< 12°C > 24°C
Arido 2 a 4 meses húmedos	Puna Seca ^{3/} (no existe en Colombia) Tierra Caliente	< 250 mm < 500 mm	< 12°C > 24°C
Semi-Desértico y Desértico 0 a 2 meses húmedos	Puna Desértica ^{3/} (No existe en Colombia) Tierra Caliente (No existe en Colombia)	< 200 mm < 200 mm	< 12°C > 24°C

1/ Sólo se muestran los pisos térmicos extremos, puesto que la inmensa variedad de combinaciones en las **tierras templadas** y las **tierras frías** no es susceptible de resumen sin importantes omisiones (de 1000 a 3000 metros sobre el nivel del mar).

2/ Regiones cafeteras, como la del Quindío en Colombia, tienen 12 meses lluviosos pero la cantidad de precipitación anual es allí inferior a la que, en dicha altura y temperatura, establecería un clima super-húmedo o muy húmedo.

3/ Cuando, a grandes alturas, la humedad es escasa y un período seco se prolonga por más de cuatro meses, desaparece el páramo y se origina la puna. En la puna peruana meridional, la posición geo-astronómica hace que empiece a manifestarse un régimen bi-estacional térmico e hídrico que la consolida. En cambio, en los Andes colombianos, típicamente ecuatoriales, se producen dos culminaciones solares anuales, suficientemente distanciadas entre sí, para producir en el año dos períodos en los que se marca una inflexión de las precipitaciones y dos períodos de alta lluviosidad. Los períodos secos, si acaso llegan a producirse, se fraccionan en dos, sus efectos acumulativos son menos notorios; en tales casos, reina en páramo con su vegetación natural típica. Sin embargo, en la Sierra Nevada de Santa Marta (11° Lat. N.) se insinúa ya un régimen bi-estacional, con un sólo período seco, más largo, pero que no alcanza a producir la puna, como en las regiones latitudinales simétricas de los Andes peruanos, en el Hemisferio Sur.

FUENTE: Guhl⁶.

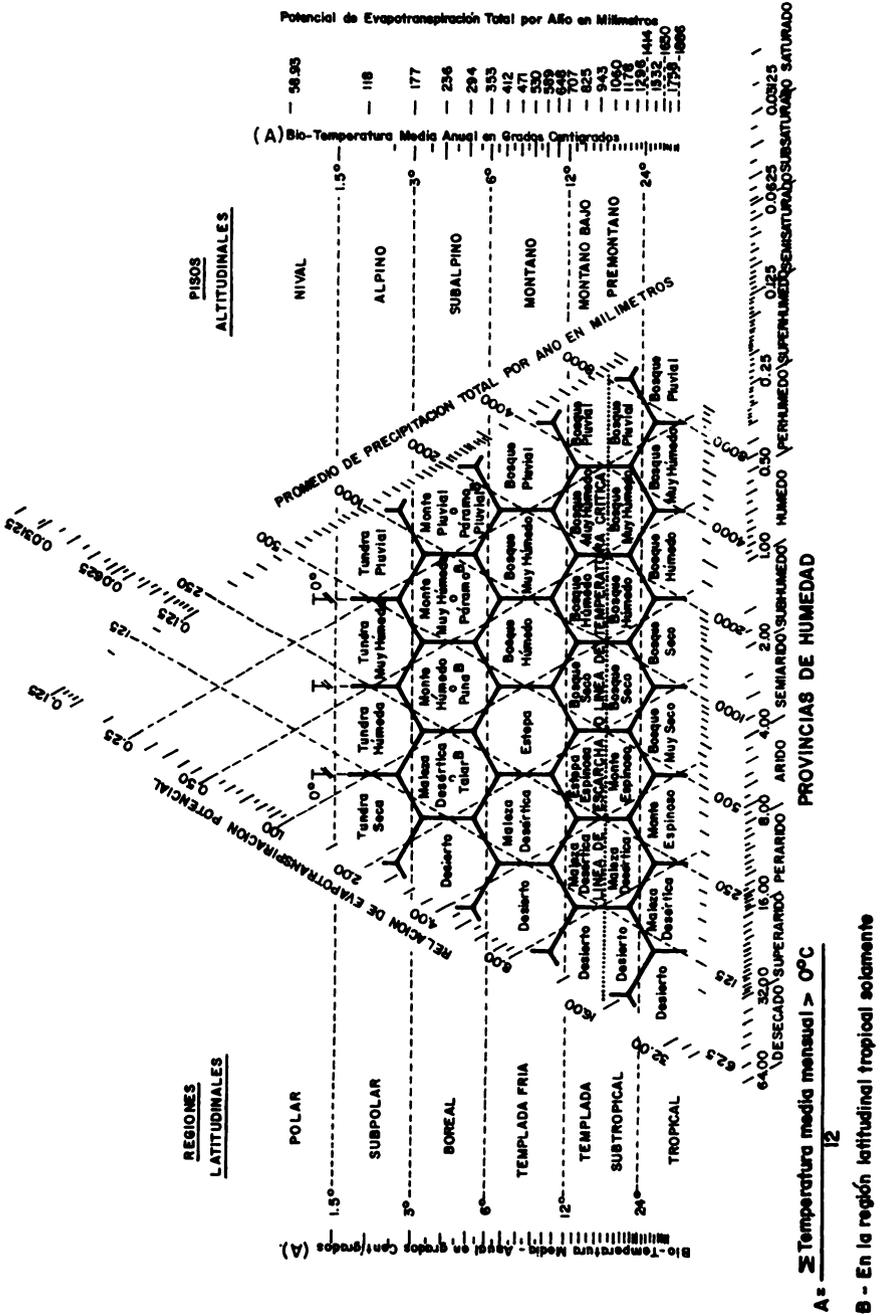


FIG. 2. Diagrama para la clasificación de formaciones vegetales del mundo. FUENTE: Holdridge⁸. Reproducido con autorización del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

Resulta significativo destacar que las tierras altas tropicales (definidas como aquellas con elevaciones superiores a 900 m) abarcan aproximadamente un 23% de los trópicos (Sánchez¹²). Estas tierras son importantes, debido a que allí se encuentra buena parte de la población y que un gran porcentaje de la agricultura de estos países tropicales se produce en su ámbito (ver suelos de ladera, Cap. 11). Una caracterización climática más detallada de las tierras altas tropicales se encuentra en Guhl⁶ y Budowski².

Dentro de los enfoques que sirven para caracterizar las regiones climáticas de América Tropical, no podía faltar en estas consideraciones la mención a la clasificación de Zonas de Vida, de Holdridge⁸. Este sistema se ilustra en la Fig. 2, en la cual la temperatura promedio anual, la evapotranspiración potencial y la precipitación se marcan por medio de puntos que confeccionan triángulos y proporcionan los límites para cada Zona de Vida. El sistema, como lo anota su autor, se basa en parámetros simples (biotemperatura, precipitación y evapotranspiración potencial). Se ha usado ampliamente en los trópicos americanos y también en algunas regiones de los trópicos asiáticos. Debido a que no hay espacio, en este capítulo, para explicar la clasificación de Holdridge,⁸ la que además se supone ampliamente conocida en los trópicos americanos, se estimula al lector a que la estudie y la utilice como una herramienta, con el propósito de caracterizar el ámbito de su zona de trabajo. Particularmente es útil para los planificadores del uso de la tierra.

BIBLIOGRAFIA

1. ALVARADO, A. 1980. El origen de los suelos. San José, Costa Rica. Universidad de Costa Rica. Facultad de Agronomía. 74 p.
2. BUDOWSKI, G. 1966. Some ecological characteristics of higher tropical mountains. *Turrialba* 16(2):159-163.
3. BUOL, S.W.; HOLE, F.; McCRAKEN, R. 1973. Soil genesis and classification. Ames, Iowa. The Iowa State University Press. 370 p.
4. CORTES, A.; FRANZMEIER, D.P. 1972. Climosequence of ash-derived soils in the Central Cordillera of Colombia. *Proc. Soil. Sci. Soc. Am.* 36:653-659.
5. ELLENBERG, H. 1979. Man's influence on tropical mountain ecosystems in South America. The second Tansley lecture. *Journal of Ecology* 67:401-416.
6. GUHL, E. 1974. Las lluvias en el clima de los Andes ecuatoriales húmedos de Colombia. Universidad Nacional. Centro de Investigaciones para el Desarrollo. Cuadernos Geográficos no. 1. 81 p. y 4 anexos.
7. HARDY, F. 1970. Edafología tropical. México, Herrero Hnos., 416 p.
8. HOLDRIDGE, L.R. 1978. Ecología basada en zonas de vida. Traducción del inglés de Jiménez Saa, H. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Serie Libros y Materiales Educativos no. 34. San José, Costa Rica. 216 p.
9. JENNY, H. 1980. The soil resource; origin and behavior. *Ecological Studies* 37. Springer-Verlag. New York, Heidelberg, Berlín. 377 p.

10. KOEPPEN, W. 1936. Das geographische system der klimate. Berlin (no consultado; citado por Young, 1980).
11. LAUER, W. Humide und aride jahrezeiten im Afrika und Südamerika in beziehung zu den vegetationsgürteln. In Bonner Geographischer Abhandlungen, Heft 9. Bonn (no consultado; citado por Guhl, 1974).
12. SANCHEZ, P.A. 1981. Suelos del trópico; características y manejo. Traducido del inglés por Edilberto Camacho. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Serie de Libros y Materiales Educativos no. 48. San José, Costa Rica. 660 p.
13. SOMBROEK, W.G. 1966. Amazon soils; a reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region. PUDOC. Wageningen. 292 p.
14. THORNTON, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. The Geographical Review 38:55-94.
15. TROJER, H. 1959. Fundamentos para una zonificación meteorológica y climatológica del trópico y especialmente de Colombia. Cenicafé. Boletín informativo no. 10:289-373. Centro Nacional de Investigaciones de Café.
16. ———. s.f. Introducción a la meteorología y climatología agrícola tropical. Manuscrito sin publicar. 171 p.
17. TROLL, C. Die tropische gebirge, ihre dreidimensionale klimatische und pflanzengeographische zonierung. Bonner Geogr. Abh. 25. Bonn (no consultado; citado por Guhl, 1974).
18. WILLIAMS, C.N.; JOSEPH, K.T. 1973. Climate, soil and crop production in the humid tropics. Revised edition. Oxford University Press. 177 p.
19. YOUNG, A. 1980. Tropical soils and soil survey. Cambridge. University Press. London. 468 p.

FACTORES EDAFICOS

Formación del Suelo

Las características morfológicas, químicas, físicas, mineralógicas y biológicas que el suelo adquiere, a través de su desarrollo, fueron reconocidas desde hace tiempo por Jenny⁹ como factores de formación del suelo. Estos intervienen activamente en el proceso. Malagón¹¹ opina que la evolución del suelo debe entenderse como un mecanismo integrador, en la búsqueda del equilibrio que presenta la capa superficial de la litosfera al ponerse en contacto con la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera. El producto de esta interacción se manifiesta a lo largo de los procesos formativos, cuyo resultado morfológico constituye el perfil del suelo. Gracias a la acción de los factores de formación, la roca se altera y origina un cuerpo natural, que se diferencia cada vez más de ella, a medida que los factores mencionados obran con mayor intensidad. Los factores de formación fueron definidos

por Buol *et al*² como "agentes, fuerzas, condiciones o combinaciones entre ellos, que influyen, han influido o pueden influir sobre el material parental, con la potencialidad de determinar su cambio".

Los factores de formación, según Jenny⁹, investigados desde el momento en que el estudio del suelo se constituyó como una ciencia, actúan interrelacionados de acuerdo con la siguiente ecuación:

$S = f(\text{cl, o.r, mp, t})$ en la cual:

S = Suelo; f = función; cl = clima; o = organismos; mp = material parental;

r = relieve; t = tiempo

Los procesos de formación del suelo se asocian con adiciones, transformaciones, translocaciones y pérdidas. Buol *et al*² definen un proceso de formación de suelo como una secuencia de eventos simples o complejos, que incluyen complicadas reacciones y/o rearrreglos simples de la materia, que afectan internamente el suelo en que se presentan.

La adición es un proceso formativo y supone el enriquecimiento del medio por acción mineral u orgánica. La pérdida de material en el suelo sucede por caminos distintos: mediante la erosión superficial o mediante el lavado de sustancias solubles (en especial, sales o sus equivalentes). La translocación supone procesos que "trasladan" las sustancias de una zona a otra dentro del perfil. Este proceso involucra dos términos: eluviación e iluviación, es decir, un empobrecimiento y un enriquecimiento, respectivamente, de zonas diferentes dentro de un mismo perfil del suelo. Otros procesos que involucran translocaciones son: calcificación, decalcificación, salinización, desalinización, lixiviación (migración de partículas minerales y arcilla en sentido vertical, hacia partes profundas del perfil), pedoturbación (mezcla de materiales constituyentes del suelo). Otros procesos específicos suceden en el suelo y son tratados *in extenso* en los libros de génesis y formación de suelos. Estos son, entre otros: podzolización, laterización, melanización y gleyzación. Las transformaciones incluyen materiales orgánicos e inorgánicos y se llevan a cabo como mecanismos de ajuste al medio en que se encuentran, hasta llegar a un estado de equilibrio. Las transformaciones de materiales orgánicos incluyen la mineralización y la humificación (ver Cap. 8). En el suelo forestal, la más significativa adición es la materia orgánica. La superficie de materia orgánica contribuye a la acumulación de suelo orgánico y ejerce

una influencia considerable sobre el suelo mineral subyacente, así como sobre la población asociada de microorganismos y animales del suelo. Por otro lado, la iluviación y eluviación, como procesos de translocación en el suelo, son muy importantes en los suelos forestales. Probablemente, los dos procesos de formación del suelo más importantes en áreas forestales son la podzolización y la laterización. Aunque estos dos procesos fueron un poco mal definidos, los términos han sido ampliamente utilizados en la literatura especializada.

La podzolización puede definirse como el proceso por medio del cual los materiales orgánicos y los sesquióxidos son translocados desde la parte superior del horizonte del suelo y, subsecuentemente, depositados en el horizonte B. Este es el proceso dominante bajo bosques naturales en climas húmedos y, la mayoría de las veces, fríos. El proceso se ve favorecido bajo vegetación que produce horizontes de materia orgánica ácidos, como en el caso de ciertas coníferas, o como en el caso de vegetación nativa como el roble (*Quercus sp*) en las montañas tropicales. Tal tipo de vegetación causa la acumulación de un humus ácido responsable de la coloración oscura de las quebradas. Esta influencia de la vegetación sobre el desarrollo de un horizonte superficial ácido ha sido comprobada por algunos autores, entre ellos, von Christen y De las Salas³, por lo común, en zonas tropicales con altas temperaturas y precipitaciones y con un lavado intenso que favorece rápidamente la acumulación de óxidos férricos bajo condiciones oxidantes. El proceso origina un horizonte llamado óxico, el cual ha sido denominado "horizonte diagnóstico", dentro de la clasificación americana de suelos. Los oxisoles, antiguamente, se clasificaban como latosoles o suelos lateríticos, y tienen un alto grado de intemperización y una escasa capacidad catiónica de cambio. Se trata de los suelos más frecuentemente asociados con el bosque húmedo tropical; pero se advierte que no todos los suelos bajo bosque lluvioso, en los trópicos, son oxisoles. Así, en la Amazonía se han encontrado suelos jóvenes de tipo Inceptisol (Cortés *et al*⁴; Proyecto Radargramétrico Amazonas¹⁷).

El Cuadro 3 resume los procesos formadores de suelos, según Buol *et al*².

CUADRO 3. Principales procesos de formación de suelos

Los procesos formadores, de acuerdo con Buol *et al*², se clasifican en cuatro categorías mayores (adiciones, pérdidas, translocaciones, transformaciones) o en procesos específicos (podzolización, salinización, laterización) que integran una o varias categorías mayores.

Un resumen integrado de categorías mayores y procesos específicos, con palabras claves para entenderlos y asociarlos con los conceptos de Duchaufour⁷, son:

Término	Cat. Mayor ^{a/}	Descripción General
Eluviación	3	Movimiento de materia en el perfil. Horizonte Albico.
Iluviación	3	Concentración de material en el perfil. Argílico-espódico.
Lavado	2	Pérdida del perfil (solum) de materiales solubles.
Enriquecimiento	1	Término general para la adición de materia al suelo.
Erosión	2	Remoción de materia de la superficie del suelo.
Acumulación Mineral	1	Adición eólica o hídrica de partículas (minerales)
Calcificación	3	Acumulación de CO ₃ Ca.CCa.
Decalcificación	3	Remoción de CO ₃ Ca de uno o más horizontes.
Salinización	3	Acumulación de sales solubles (Cl, SO ₄ , Ca, Mg, Na, k) Horizontes sálicos.
Desalinización	3	Remoción de sales solubles de los H. sálicos.
Alcalización (Solonización)	3	Acumulación de iones de Na en el Complejo de Cambio.
Desalcalización (Solonización)	3	Eliminación de iones Na y sales del H. Nítrico.
Lixiviación	3	Migración mecánica de arcillas y partículas pequeñas del A al B Argílico.
Pedoturbación	3	Cambio, volteamiento, ciclaje biológico y físico de materia en el suelo, homogeneizando el solum.
Podzolización	3-4	Migración de Fe, Al y, o humus. Silicación en E.
Laterización	3-4	Migración de Si. Acumulación de Fe y Al Oxico, Mat. petroférico, lateritas, plintita. Concreciones, desilicación, ferralización, ferritización, alitización, latosolización.

Continuación Cuadro 3.

Término	Cat. Mayor ^{a/}	Descripción General
Descomposición	4	Alteración de materiales minerales y orgánicos.
Síntesis	4	Formación de partículas minerales y sustancias orgánicas.
Melanización	1-3	Oscurecimiento de materiales minerales inicialmente claros por reacción con mat. húmicos. Mólico. Umbrico.
Aclaramiento (Leuconización)	3	Aclaramiento o emblanquecimiento de horizontes, al desaparecer materiales húmicos por transformación o remoción.
Acumulación orgánica (Littering)	1	Acumulación de residuos orgánicos y humus a profundidades menores de 30 cm sobre la superficie de suelos minerales.
Paludización	4	Acumulación orgánica (mayor de 30 cm) Histosoles.
Humificación	4	Transformación de M.O. en humus.
Mineralización	4	Descomposición de M.O.
Gleyzación	3-4	Reducción de Fe, movilización, coloración gris.
Perdización, Rubefacción, ferruginación	3-4	Liberación de Fe a partir de minerales primarios, su progresiva oxidación o hidratación genera coloraciones pardas, pardo rojizas y rojas, respectivamente.

a/ 1 = Adición o ganancia; 2 = Pérdidas; 3 = Translocaciones; 4 = Transformaciones.

FUENTE: Douchafour⁷, adaptado por Malagón¹².

El suelo forestal

La importancia del suelo bajo ecosistemas forestales naturales fue reconocida ya por unos pocos científicos, considerados pioneros en el siglo XIX en la práctica forestal en Europa. En EUA, la ciencia del suelo forestal fue poco considerada hasta la Primera Guerra Mundial, después de la cual hubo necesidad de un manejo selectivo de los bosques con un rendimiento sostenido, así como de la reforestación de terrenos abandonados. Los libros clásicos de Lutz y Chandler¹¹ y

Wilde²⁴, fueron utilizados por muchos años por los estudiantes de las zonas templadas y sirvieron de base para las escuelas de Ingeniería Forestal de los trópicos. La obra de Pritchett¹⁷ presenta una concepción moderna del suelo forestal y de su importancia como ecosistema y constituye una respuesta a la moderna práctica del manejo de bosques, con especial referencia a los Estados Unidos.

La necesidad de la separación del estudio del **suelo forestal** es puesta en duda por quienes no justifican una diferencia entre un suelo que soporta bosques y un suelo dedicado a cultivos agrícolas. Esto es especialmente cierto para las regiones tropicales, donde la mayoría de las superficies boscosas han sido taladas y dedicadas posteriormente a cultivos de subsistencia; y en las zonas de ladera, destinadas a cultivos anuales y/o permanentes (ver Cap. 11). Sin embargo, esta generalización debe tomarse con reservas, puesto que los ecosistemas boscosos están asociados a suelos con ciertas propiedades físicas y químicas que los diferencian ampliamente de los suelos agrícolas. La cubierta forestal y su estructura boscosa proveen al suelo de un microclima y de un espectro de microorganismos diferente de aquéllos asociados con la mayoría de otros suelos. Tal proceso dinámico, como el del ciclo de nutrimentos entre los diferentes componentes del bosque y la formación de ácidos orgánicos, a partir de los desechos aportados por la hojarasca y el subsecuente lavado de las bases, da un carácter distintivo a los suelos bajo cubierta forestal.

Generalmente los suelos dedicados a la agricultura son, por varias razones, más fértiles que los suelos forestales propiamente dichos. Las bacterias son la microflora predominante y las lombrices son probablemente la mesofauna más importante de los terrenos agrícolas.

En un sentido muy general, un suelo forestal puede considerarse como aquél que se ha desarrollado bajo la influencia de una cubierta forestal. Este punto de vista reconoce el efecto marcado de las raíces profundas de los árboles y la asociación de organismos específicos de la vegetación forestal y la capa de hojarasca, junto con su lavado promovido por productos de su descomposición sobre la génesis del suelo (Fig. 3). Si aceptamos esta definición, los suelos forestales pueden considerarse con un cubrimiento que abarca aproximadamente la mitad de la superficie terrestre (Pritchett¹⁷). En efecto, esencialmente todos los suelos —con excepción de aquellos suelos de tundra, praderas y desiertos— fueron desarrollados bajo una cubierta forestal y han adquirido algunas propiedades distintivas como resultado de tal asociación. Evidentemente, no todos estos suelos están cubiertos ba-

jo bosque hoy día. En realidad, pocos bosques verdaderamente vírgenes existen hoy en regiones pobladas del globo. La conversión del bosque nativo, en los trópicos húmedos americanos, en sistemas de agricultura migratoria, es un fenómeno ampliamente conocido y practicado por más de una centuria (ver Cap. 11). Por otra parte, en años recientes, grandes superficies de terrenos, relativamente marginales para la economía agrícola, se han visto cubiertos de plantaciones forestales de rápido crecimiento e intensamente manejadas en varios países de América Tropical. Este aspecto se trata con cierto detalle en el Cap. 13.

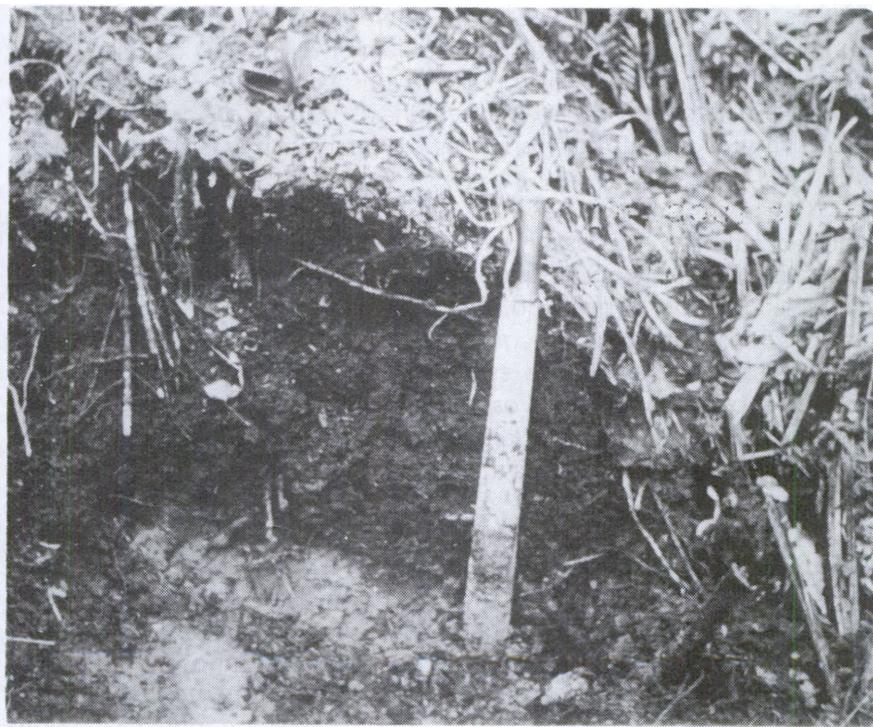


FIG. 3. Suelo de la región de Anchicayá, Colombia. Bosque húmedo premontano (bmh. PM), según la clasificación de Zonas de Vida de Holdridge (3500 mm, y 1000 m s.n.m.). Nótese el grueso (50 cm) horizonte orgánico (H) sobre otro (Bg) pseudogleyizado arcilloso. Un manto de materia orgánica en descomposición es típico de todos los sitios no disturbados bajo bosque, en las áreas húmedas y perhúmedas de Colombia (como el que presenta la foto), con excepción de las zonas bajas. Este horizonte es de gran importancia para la regulación de la infiltración en las pendientes. (Foto: H.C. von Christen).

Por causa de la alteración de ciertas propiedades de los suelos forestales, como resultado de un manejo intensivo, es natural que la distinción entre suelos forestales y suelos agrícolas sea cada vez menos evidente. Aunque algunas características adquiridas del suelo, durante su desarrollo, persisten por largo tiempo, después de que la cubierta forestal ha desaparecido y el suelo se ha utilizado para cultivos agrícolas, otras características se han modificado drásticamente, en razón de las prácticas asociadas con el uso agrícola. Por dicho motivo los suelos forestales se consideran, en este contexto, en un sentido mucho más restringido, como aquéllos que soportan vegetación forestal o una cubierta forestal hecha por el hombre. La aclaración es particularmente necesaria, debido a que los aspectos genéticos en general sólo se tratan superficialmente, puesto que éste no es el objetivo principal del libro. Énfasis especial se pondrá en los problemas nutricionales de las plantaciones forestales, y en los de la silvicultura y el manejo de los suelos cubiertos con este tipo de vegetación (Ver Cap. 13).

Ciertas propiedades de los suelos forestales difieren de las de los suelos cultivados. Estas diferencias son importantes de anotar; en parte, debido al hecho de que la mayoría de suelos "deseables" han sido seleccionados a menudo para usos agrícolas y las tierras restantes son consideradas como marginales (suelos rocosos, tierras escarpadas o erosionadas, suelos esqueléticos). Con frecuencia se observan terrenos muy productivos potencialmente para bosques ocupados con cosechas agrícolas, debido a su localización respecto de los centros de población y de los mercados.

Características químicas

La importancia de las propiedades químicas del suelo para el crecimiento de los árboles fue ignorada por mucho tiempo, pero ha ganado considerable atención en años recientes; básicamente, debido a las grandes demandas de tierras aptas para reforestación industrial, como resultado del aumento de población y del manejo intensivo de plantaciones forestales de rápido crecimiento y, por consiguiente, de rápido aprovechamiento. En efecto, se reconoce hoy en día que la demanda anual de nutrimentos de los árboles forestales es comparativamente alta, y que el uso de estos nutrimentos por los árboles es muy eficiente, a causa del ciclo cerrado y la explotación del espacio radicular en zonas profundas, habitualmente no utilizadas por los cultivos agrícolas. Esta habilidad capacita a ciertas especies para sobrevivir en suelos relativamente infértiles. Este aspecto de las relaciones nu-

tricionales y del crecimiento de las plantaciones forestales se trata en el Cap. 13. Por otra parte, las características químicas típicas de suelos de selva, sobre todo en las bajuras tropicales, son su extrema infertilidad y alta acidez. Junto a las limitaciones indicadas, se ha comprobado, en estudios recientes, la alta toxicidad de aluminio y la escasa disponibilidad de fósforo, en suelos de las extensas llanuras boscosas del trópico americano (Amazonía, Orinoquía, Llanos Orientales). El manejo de los suelos tropicales y sus características se tratan ampliamente en el libro de Pedro Sánchez²¹, por lo que se remite al lector a esta excelente obra. También se trata este aspecto en el Cap. 12, con especial referencia a las opciones de manejo de las tierras dedicadas actualmente a agricultura migratoria.

Entre las grandes masas forestales naturales, influidas por procesos químicos, se destacan los manglares, denominados fisiográficamente **pantanos de agua salada**. Estos se forman a lo largo de las costas bajas. En los trópicos, se hallan cubiertos predominantemente con bosque. En Colombia, se extienden unos 500 km a lo largo de la costa sur del Océano Pacífico, pero también se presentan en pequeñas manchas en la Costa Atlántica. Debido a su alto contenido de sal, los suelos fangosos sólo pueden ser habitados por halófitas. En Colombia, las especies más extendidas son mangle rojo (*Rhizophora mangle*) y mangle salado (*Avicennia nitida*). Este ecosistema ha sido intensamente explotado en los trópicos; y su utilidad, varias veces cuestionada desde el punto de vista de la industria maderera. La acidez en estos suelos juega un papel muy importante para el desarrollo de la vegetación. Además de su mal drenaje y aireación, esos suelos muestran una severa y definitiva acidificación, debido a la oxidación de sulfitos (principalmente piritas), los cuales predominan en la formación del ácido sulfúrico. Durante inundaciones, los valores α pH pueden aumentar gradualmente casi hasta neutro (von Christen³; Moormann¹³). Estos paisajes se conocen bajo el nombre de *Catclays*, en los trópicos. Según la clasificación americana de suelos, los más antiguos pantanos de manglar se denominan *thionic tropa-quepts* y, cuando presentan fuerte acidificación, *typical thiaquepts* (Cortés⁴). Formaciones edáficas más jóvenes se llaman comúnmente *potential acid sulfat soils* y últimamente *thionic hydraquepts*. Los suelos con un alto contenido de sulfatos se designan como *typical thiaquepts*. Otros suelos, influidos más por propiedades químicas que físicas en el desarrollo de vegetación natural, son los pantanos orgánicos, las turbas (histosoles), los suelos afectados por procesos de podsolización y los suelos ferralíticos (oxisoles) (De las Salas²⁰; von Christen³; Andriese¹).

Características físicas

Las características físicas han sido consideradas desde hace bastante tiempo como de especial influencia, dentro de las propiedades del suelo, sobre el crecimiento y la distribución de las comunidades forestales. La opinión de que las propiedades físicas eran de primera importancia para el desarrollo de la vegetación, condujo a los primeros investigadores a minimizar, o aún a ignorar, la influencia de las propiedades químicas y biológicas del suelo sobre el sitio. Esta actitud ha cambiado recientemente, habida cuenta de la necesidad de utilizar más intensivamente los bosques, sobre todo de tipo artificial. Un panorama más balanceado ha evolucionado a partir de la importancia de todas las propiedades del suelo sobre el ambiente forestal. Esta posición refleja el aspecto de la estrecha interrelación de las propiedades químicas, físicas y biológicas; y se evidencia en el hecho de que, si bien las buenas propiedades físicas del suelo pueden ayudar a compensar las malas propiedades químicas (extrema acidez y baja fertilidad, entre las principales) o algunas propiedades biológicas limitativas (baja descomposición del humus), la productividad del suelo no puede aumentar solamente con base en las propiedades físicas. Las propiedades físicas del suelo están sujetas a menor alteración que las químicas. La estructura y la porosidad, sin embargo, pueden ser alteradas por el manejo del suelo bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, al drenar los suelos pantanosos, el silvicultor puede introducir cambios indirectos en propiedades tales como la humedad, la aireación y la temperatura. El drenaje, a su vez, puede incrementar la productividad efectiva de las raíces. Un arado profundo, por ejemplo, que fracture los primeros horizontes duros del suelo, puede usarse para incrementar las condiciones de desarrollo del espacio radical. Sin embargo, algunas propiedades como textura o color y las relacionadas con las características mismas del perfil, no pueden cambiarse fácilmente.

La relación entre las características físicas del suelo y el crecimiento de monocultivos forestales se trata en detalle en el Cap. 13.

Las principales características físicas de los suelos que influyen sobre la fisionomía y las características estructurales de la vegetación natural en los trópicos, son: la porosidad, el drenaje, la textura, la humedad, la profundidad y la permeabilidad. Las asociaciones edafonales se tratan en detalle en el Cap. 4. Sin embargo, es conveniente mencionar el término **catena**, el cual es útil para describir los suelos asociados, de la misma forma en que se unen en una cadena los eslabones. Una catena es una secuencia de suelos, aproximadamente de

la misma edad y derivados de un mismo material parental, que se presentan bajo condiciones climáticas parecidas, pero con diferentes características, debido a variaciones en relieve y en drenaje.

La humedad influye poderosamente en la regeneración del bosque, controlando la germinación de las semillas, así como la sobrevivencia y el crecimiento de las plántulas. El movimiento capilar del agua, desde las regiones húmedas a las más secas, en los suelos que se encuentran en estados de humedad por debajo de la capacidad de campo, es baja; y si no existe movimiento capilar hacia las raíces, la expansión del sistema radical se frenará y causará limitaciones en el crecimiento y en la sobrevivencia. Por otra parte, la resistencia de los árboles a ciertos ataques de insectos se reduce, aparentemente, cuando existen condiciones de escasez de humedad. El inicio de la floración, por ejemplo, puede ser inducido algunas veces, debido a una tensión de humedad, mientras que unas condiciones buenas de humedad en el suelo son indispensables para lograr una floración a tiempo (Pritchett¹⁷). Finalmente, la disponibilidad de nutrimentos, su suministro y transporte dependen de una adecuada humedad del suelo. En efecto, una satisfactoria humedad del suelo es esencial para el desarrollo de los árboles; y la calidad del sitio está ampliamente determinada por las propiedades físicas del suelo que influyen las relaciones de humedad. Por esta razón, los factores físicos y fisiográficos que actúan sobre la humedad edáfica y el almacenamiento y disponibilidad de agua, son frecuentemente los más utilizados en la descripción y evaluación de la calidad de los sitios forestales.

Características biológicas

La composición biológica del suelo es de particular importancia para los procesos de descomposición de la materia orgánica y las relaciones tróficas del suelo. Más adelante, se verá que existen formas vegetales y animales que constituyen una maquinaria, con la descomposición del material orgánico y el cierre de la mayor parte de los ciclos geoquímicos relacionados con la biosfera. Las relaciones tróficas del suelo constituyen una parte de la red de relaciones de los ecosistemas terrestres. La cantidad de materia orgánica muerta es atacada (bajo diversas fases, en las que entran la microflora, la microfauna y la mesofauna) y, por lo tanto, parcialmente descompuesta. Los productos de esta degradación se introducen en el suelo. Se produce así la mineralización de una porción importante de materia orgánica, que queda a disposición de las raíces de las plantas. La energía que fluye

en estos procesos permite mantener las vías tróficas paralelas (degradación, comensalismo, parasitismo), las cuales cumplen funciones de control de la abundancia y de la estructura de la población biológica del suelo. Las bacterias y hongos atacan directamente —o por medio de la microfauna y de la mesofauna— los restos vegetales, descomponiéndolos; la mesofauna controla la población microbiana, alimentándose de ella pero también favoreciendo su difusión. Algunos ejemplares de la mesofauna y la macrofauna controlan la población zoológica de menor tamaño, mientras que la megafauna controla tanto el resto de la fauna como el poblamiento vegetal epígeo, al atacar sus aparatos radicales (Parisi ¹⁵). Para obtener una idea del mosaico de organismos edáficos en la parte superior del suelo, sobre todo en la capa orgánica, se presenta la Fig. 4.



FIG. 4. Mosaico de deyecciones de organismos edáficos descomponedores de materia orgánica: b) y c) enchytraeidos; d) milbas; h) Artrópodos. Cama de hojas de *Fagus silvatica*. (Foto: cortesía de U. Babel, Alemania Federal).

La mayoría de los organismos activos en el suelo dependen, para su funcionamiento, de factores edáficos como la humedad, la temperatura, la aireación, la acidez y el estado nutricional, así como de los suministros de energía. Los mismos factores influyen grandemente en la distribución espacial de los organismos. Las condiciones favorables para la mayoría de los organismos pueden encontrarse en el nivel denominado espacio radical intensivo, situado entre la capa de humus y el horizonte inmediatamente subyacente.

Aunque algunos organismos prefieren moverse dentro de la parte orgánica del suelo, otros se encuentran a través de todo el perfil. Sin embargo, los organismos fotosintéticos, tales como las algas verdeazulosas, se encuentran solamente en materiales de superficie, donde la luz no limita la fotosíntesis. Otros organismos toman su carbono del CO_2 y su energía de la oxidación de las sustancias inorgánicas y, por consiguiente, están menos restringidos en su distribución espacial. La gran mayoría de organismos toman su carbono de los materiales complejos orgánicos y su abundancia es directamente dependiente de la presencia de un sustrato orgánico apropiado. Algunos de estos organismos (de los más pequeños) no se encuentran libres en el suelo, sino que están asociados a arcillas o a coloides orgánicos por medio de las fuerzas de intercambio de cationes.

Para dar una idea de los diferentes tipos de organismos y de sus funciones en el suelo, se ha elaborado el Cuadro 4.

CUADRO 4: Principales organismos del suelo y su función.

Tipos	Función
Microflora	
Bacterias autotróficas (<i>Nitrosomonas</i> <i>Nitrobacter</i>)	Transformación de compuestos nitrogenados
<i>Thiobacillus</i> <i>T. thiooxidans</i>	Oxidantes minerales (azufre) $2\text{S} + 3\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \text{-----} 2\text{H}_2\text{SO}_4$
<i>T. ferrooxidans</i>	Oxidantes minerales (hierro)
Organismos heterotróficos	
<i>Azotobacter</i> <i>Beijerinckia</i>	Fijación biológica del nitrógeno (N_2) (organismos libres)

Continuación Cuadro 4.

Tipos	Función
<i>Spirillum</i> <i>Clostridium</i> <i>Rhizobium</i>	Fijación biológica del nitrógeno (N ₂) (organismos simbióticos)
<i>Actinomicetes</i> <i>Streptomices</i> <i>Nocardia</i> <i>Frankia</i> Hongos	Descomposición de celulosa; metabolización de parafinas, fenoles, esteroides, reguladores de la microflora inductores de nodulación en no leguminosas (<i>Alnus</i>) Descomposición de celulosa, hemicelulosa, pectinas, almidones, grasas, ligninas; Predadores de fauna (protozoos, nemátodos) y reguladores del balance microbiológico del suelo. Patogenicidad (en vivero y en raíces de plantas adultas); función simbiótica (micorrizas).
Microfauna	
Protozoos flagelados Rizópodos Ciliados	Descomposición de materia orgánica; predación de bacterias
Nemátodos <i>Heterodera</i> <i>Meloidogyne</i>	fitoparásitos
<i>Kumbricus terrestris</i>	formación de humus, mezcla de material orgánico y mineral; mejoradores de la estructura y aireación del suelo; (concentración en suelos forestales entre 1/2 millón y 2 y 1/2 millones/ha).
<i>Octalaseum</i> <i>Dendrobaena</i>	mezcladores de detritos orgánicos.
Artrópodos	
Acaros oribátidos	detritófagos
Arácnidos	carnívoros
Miriápodos	fitófagos, detritófagos, carnívoros
Colémbolos	fitófagos
Coleópteros	funciones diversas
Ortópteros	fitófagos
Himenópteros y	
Hemípteros	funciones diversas
Hormigas y	
Termitas	transporte de material mineral (las termitas en Africa forman grandes montículos; menos conspícuos en las sabanas americanas).

FUENTE: Parisi¹⁵, Pritchett¹⁷. Adaptado.

Micorrizas. Dentro de la biología del suelo forestal, no podía faltar siquiera una alusión al importante papel que juegan las micorrizas en el bosque. Este tema daría por sí solo material para un capítulo. Sin embargo, el autor ha respetado este tópico propio de los especialistas y remite al estudioso de tales temas a la bibliografía especializada, en la que se debe mencionar especialmente el trabajo de Saif¹⁹, quien recopiló resúmenes de más de 1200 trabajos sobre micorrizas, en el período comprendido entre 1970 y 1982.

Las micorrizas son organismos especializados, parecidos a una raíz, y formados por la asociación simbiótica de ciertos hongos con raíces de plantas desarrolladas. Estos hongos específicos crecen vigorosamente sobre las porciones de las raíces e invaden el área del sistema radical, el cual es responsable, en primer término, de la absorción de nutrimentos (Pritchett¹⁷). De acuerdo con la localización de los elementos fungosos, las micorrizas se clasifican en ectomicorrizas y endomicorrizas. Un tercer grupo agrupa las dos clases de micorrizas mencionadas. Este grupo ha sido reconocido también, aunque se cree que corresponde a un estado transicional entre los dos tipos mencionados (Pedraza¹⁶). En el tipo ecto, las hifas del hongo ocurren en los espacios intercelulares de las células corticales y forman un manto compacto alrededor de las raíces; en el grupo endo, las hifas ocurren intracelularmente, así como extracelularmente en la corteza de la raíz, pero no forman un manto fungal. Las endomicorrizas se denominan generalmente en la literatura como vesiculares-arbusculares, debido a su morfología. Las Figs. 5 y 6 representan el tipo de micorriza endo y ecto tropical respectivamente. Las endomicorrizas son esenciales para la sobrevivencia de casi todos los árboles tropicales. Ayudan en la absorción de nutrimentos, hecho comprobado para el fósforo, y supuestamente son importantes también para otros elementos. Son importantes además para las relaciones planta-suelo, suelo-agua; y reducen las infecciones de los hongos patógenos. Por otro lado, estas micorrizas pueden ser susceptibles de prácticas silviculturales y agronómicas. Al cambiar las poblaciones de micorrizas, se espera la interrupción del ciclo biogeoquímico que mantiene la vegetación exuberante en suelos tropicales muy lavados. Las especies arbóreas tropicales de particular interés, en las cuales ocurren micorrizas, son reportadas por Pedraza¹⁶, como de las familias Meliácea, Boraginácea, Morácea, Burserácea, Anonácea, Anacardiácea, Malvácea, Lecythydáceas, Sapindáceas, Magnoliácea, Podocarpácea.

La micorriza ectotrófica presenta una distribución mucho más restringida que la endotrófica y ocurre comúnmente en las coníferas

(*Pinus*) y Fagáceas (*Quercus spp*) (Pritchett,¹⁷; Pedraza¹⁶). Investigaciones recientes han detectado la presencia de ectomicorrizas también en las especies de *Eucalyptus*.

Pedraza¹⁶ comenta que los hongos que, comúnmente, se encuentran formando Ectomicorrizas son *Basidiomicetos* de las familias Boletácea, Amanitácea, Cortinariácea, Russulácea, Thelephorácea, Rhizopogonácea, Sclerodermatácea, Paxillacea, Cantharellácea, Lycoperdácea, Pisolithácea y otras; algunos *Ascomicetos* de las familias Bulgariácea, Helvellácea, Pezizácea, Elaphomicetácea, Tuberácea (principalmente el género *tuber* que produce las famosas trufas de gran valor nutritivo y económico) y algunos *Deuteromicetos* del orden Mycelia Sterilia (géneros *Cenococcum* y *Mycelium*). El mismo autor relaciona algunos géneros de hongos, de ocurrencia común en pinos y robles en Colombia: *Boletus granulatus*, *B. luteus*, *B. edulis*, *Amanita muscaria*, *A. gemmata*, *A. humboldtii*, *Laccaria laccata*, *L. amethystina*, *Cantharellus cibarius*, *Elaphomyces muricatus*, *Telephora terrestris*, *Cenococcum graniforme*, *Rhizopogon reseolus*, *Russula brevipes*, *Lycoperdon perlatum* y *Scleroderma albidum* (en *Eucalyptus*).

El mecanismo más importante para la conservación, absorción y translocación de nutrimentos se encuentra en el sistema radical. Los hongos micorrícicos juegan un importante papel en estos procesos. En sentido general, se han considerado las micorrizas como elementos de absorción, debido a su gran cantidad de hifas (del hongo), las cuales actúan como esponjas. Experimentos con isótopos (Ca^{45} , P^{32}) marcados, en el bosque amazónico venezolano, comprobaron que casi el 100% de estos dos elementos fue inmediatamente absorbido por la vegetación (Jordan¹⁰). Las hifas fungales servían de puente entre la hojarasca y las raíces. Este mecanismo de translocación de nutrimentos es especialmente promisorio para el crecimiento vegetal, en suelos como los Oxisoles y Ultisoles, que presentan altas tasas de inmovilización de fósforo y son los más comunes en el trópico húmedo. Janos⁸, citado por el NRC, comprobó que la falta de micorrizas vesiculares-arbusculares era un obstáculo para la recuperación de terrenos degradados en Costa Rica.

Clasificación de los suelos forestales

No se puede hablar de una clasificación estricta para los suelos forestales de trópico, puesto que, como se explicó al principio de este

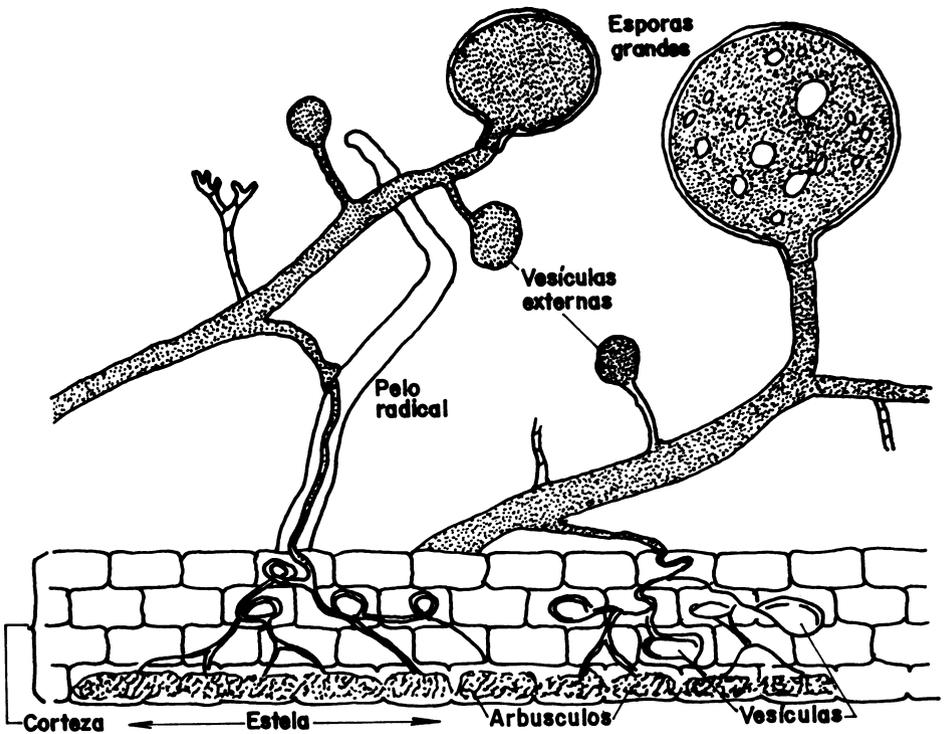


FIG. 5. Presentación gráfica de una endomicorriza (no a escala). Nicolson. Una simbiosis universal; micorriza vesicular-arbuscular. En *Science Progress* 55:561-181, 1967. Reproducido con autorización de Blackwell Scientific Publications Ltd., Oxford, England.

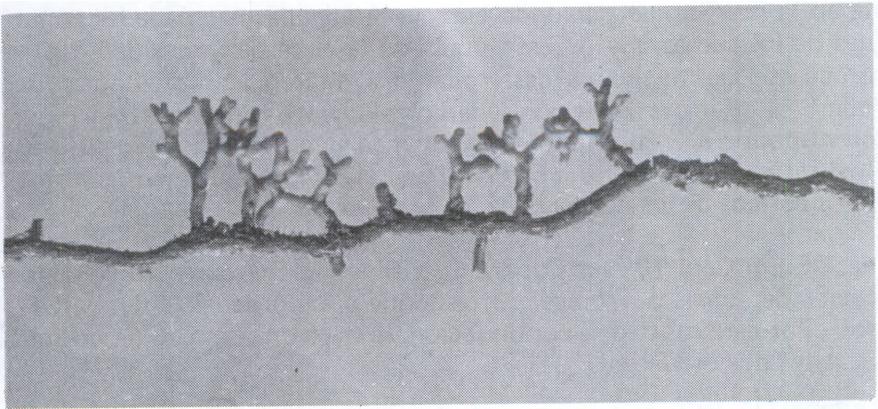


FIG. 6. Micorriza del tipo coraloides simple formada por *Telephora terrestris* en raíces de plántulas de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Bart et Golf. (Foto: cortesía de José Eduardo Pedraza A.).

capítulo, la mayoría de las regiones con bosque han sido sometidas a procesos de deforestación y se encuentran actualmente bajo otro tipo de uso de la tierra, especialmente bajo agricultura. Ya se describieron las características químicas, físicas y biológicas que definen un suelo forestal. Más bien debería hablarse sobre la clasificación de los terrenos forestales; y esto, en dos sentidos: suelos forestales absolutos, es decir, aquellos que excluyen usos distintos del bosque, y suelos con aptitud forestal. Los últimos serían los que, por sus características, representan un potencial mayor para cultivos forestales que para otros cultivos. Este aspecto se trata *in extenso* en el Cap. 13. Teniendo en cuenta que, en los capítulos siguientes, se hace mención de grupos de suelos característicos de ecosistemas típicos de América Tropical (ver, por ejemplo, el Cap. 10), cuya nomenclatura obedece a la clasificación americana de suelos, se explican someramente algunos de estos términos con el objeto de que el lector tenga una base de referencia; sin embargo, la abundante literatura sobre taxonomía de suelos existente, hace innecesario su tratamiento en el presente capítulo.

El sistema de clasificación de suelos de los Estados Unidos comprende las siguientes características (Cortés ⁴): Orden, Suborden, Gran Grupo, Subgrupo, Familia y Serie. Según esta clasificación, se han reconocido 10 órdenes, a saber: Entisoles, Vertisoles, Inceptisoles, Aridisoles, Molisoles, Espodosoles, Alfisoles, Ultisoles, Oxisoles e Histosoles.

El criterio para diferenciar los órdenes se basa fundamentalmente en la morfología, teniendo en cuenta aquellas propiedades comunes de los suelos que difieren poco, en la clase de intensidad, de los procesos que tienden a desarrollar o a diferenciar horizontes. Los nombres de los órdenes contienen un elemento formativo básico que corresponde a un prefijo; además, tienen una sílaba final común: *sol* (del latín *solum*, suelo). El Cuadro 5 relaciona los elementos formativos básicos de los nombres de los órdenes.

En el Cap. 10 (ver Cuadro 27), se menciona que el 82% de los suelos de América Tropical corresponde a los órdenes Ultisol y Oxisol. Por este motivo, a continuación, se hace una síntesis descriptiva de estos dos órdenes:

1. Ultisoles. Las características más sobresalientes de estos suelos son la presencia de un horizonte argílico y la baja saturación de bases del perfil (Cortés⁴).

CUADRO 5: Elementos formativos básicos de los nombres de los Ordenes de la clasificación americana de suelos.

Orden	Elemento formativo básico	Etimología del elemento formativo
Entisol	ent	<i>juventus</i> (juventud)
Vertisol	ert	<i>verto</i> (invertir)
Inceptisol	ept	<i>inceptum</i> (comienzo)
Aridisol	id	<i>aridus</i> (seco)
Molisol	ol	<i>mollis</i> (blando)
Spodosol	od	<i>spodos</i> (ceniza)
Alfisol	alf	símbola sin sentido
Ultisol	ult	<i>ultimus</i> (último)
Oxisol	ox	<i>óxido</i>
Histosol	ist	<i>histos</i> (tejido)

FUENTE: Cortés⁶.

En el trópico, debido a la coloración rojiza de estos suelos, se han identificado como Latosoles, suelos lateríticos y bajo otras denominaciones parecidas. Los procesos genéticos más importantes de estos suelos son la migración mecánica de arcilla (translocación) y el lavado de bases. La saturación de bases se conserva por encima del 35%. Los Ultisoles poseen generalmente más del tres por ciento de minerales fácilmente intemperizables y cantidades apreciables de material amorfo o arcillas de tipo 2.1. Este aspecto los diferencia de sus congéneres (Oxisoles), los cuales son más antiguos. La fracción arcilla está formada principalmente por caolinita, gibsitita y arcillas interlaminares de óxidos (generalmente de óxidos de aluminio). La migración de arcilla conduce a la formación de un horizonte de lavado (horizonte E), a veces denominado horizonte albeo (por su color blanquecino), y de un horizonte argílico (por su acumulación de arcilla). Una propiedad importante de los Ultisoles es la formación de Plintita*.

* Plintita: del griego *Plinthos*, ladrillo. Es la mezcla de arcilla con cuarzo y otros diluyentes, rica en sesquióxidos, pobre en humus, altamente meteorizada, que por lo común se encuentra como en motas rojas, casi siempre en formaciones laminares, poligonales o reticuladas. La plintita se transforma irreversiblemente en un *duripan* o en agregados irregulares, con los repetidos humedecimientos y secados, o es el relicto

Los Ultisoles incluyen la mayor parte de los suelos que antiguamente se denominaban *red yellow podzolic*, *reddish-brown lateritic* y *Rubrozem*, en EUA. También están incluidos algunos suelos muy ácidos, que se consideraban *humic gley* y *low humic gley* y algunos de los llamados *ground water laterites*.

2. Oxisoles. Estos suelos incluyen aquéllos que en años pasados se llamaban Latosoles y muchos que se denominaban *Ground-Water Laterites*. Antiguamente fueron denominados **suelos lateríticos** y, en la clasificación francesa, se denominan todavía como suelos ferralíticos, ferralsoles, mientras que los belgas los asimilan a los **Caolisoles**. Este grupo comprende todos los suelos que poseen horizontes óxicos**.

Los Oxisoles pueden contener plintita, ya sea en forma dura o blanda, pero ésta sólo será diagnóstica del orden cuando se la encuentre cerca de la superficie en su forma blanda (Soil Survey Staff²³).

Cortés⁴ anota que los Oxisoles generalmente se encuentran en regiones situadas por debajo de los 2000 a 1500 m. En estas áreas, la temperatura del aire es más o menos uniforme durante todo el año e inclusive presenta fluctuaciones diurnas bajas, por lo que se la clasifica como Isotermal o Isohipertermal, según el caso. Los Oxisoles soportan una extensa gama de tipos de vegetación, pero las regiones más extensas están cubiertas de bosque húmedo tropical, vegetación de sabana, bosque semideciduo y vegetación arbustiva y espinosa. Debido a su extrema exposición a la intemperie, existe una reserva muy baja en nutrimentos, fenómeno que ha sido comprobado por varios investigadores de las pluviselvas tropicales (ver Caps. 10, 11 y 12). Los Oxisoles pueden formarse a partir de una gran variedad de materiales parentales. Estos pueden ser derivados de granitos y sedimentos silíceos o basaltos, e inclusive gabros. En Colombia, el material parental de estos suelos localizados en la Orinoquía y en la Amazonía está formado por sedimentos aluviales ácidos mezclados, ricos en cuarzo y caolinita, procedentes de la denudación de la Cordillera Andina y el Macizo de las Guyanas (Cortés⁴; Proyecto Radargramétrico Amazonas^{1 8}).

endurecido de los moteados blandos rojos. (7a. aproximación: un sistema comprensible de clasificación de suelos. INTA, Argentina. Versión castellana de P.H. Etcheverhere).

** Horizonte en el cual la meteorización ha removido o alterado en cierto momento una gran parte de la sílice combinada con hierro y aluminio, pero no necesariamente el cuarzo o la arcilla del retículo 1:1. Como resultado de la meteorización se tiene una concentración de minerales del tamaño de la arcilla (Soil Survey Staff. ²³).

Los procesos pedogenéticos más importantes, que tienen lugar durante la formación de los Oxisoles son: la migración de sílice (desilificación); la acumulación de hierro y aluminio y de material petroférrico; la formación de concreciones, la desaparición casi total de minerales fácilmente intemperizables, de las arcillas de tipo 2:1 y el lavado casi completo de los elementos nutritivos (Malagón¹²).

RESUMEN

1. La evolución del suelo debe entenderse como un mecanismo integrador, en la búsqueda del equilibrio que presenta la capa superficial de la litosfera, al ponerse en contacto con la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera. El producto de esta interacción se manifiesta a través de procesos formativos, cuyo resultado morfológico constituye el perfil del suelo.
2. Los factores de formación del suelo han sido definidos como agentes, fuerzas, condiciones o combinaciones entre ellos, que influyen, han influido o pueden influir sobre el material parental, con la potencialidad de determinar su cambio.
3. Los procesos de formación del suelo se asocian con adiciones, transformaciones, translocaciones y pérdidas.
4. Un suelo forestal —en un sentido muy general— puede considerarse como aquel que se ha desarrollado bajo la influencia de una cubierta forestal. Este punto de vista reconoce el efecto marcado de las raíces profundas de los árboles y la asociación de organismos específicos de la vegetación forestal y la capa de hojarasca, junto con su lavado, promovido por productos de su descomposición, sobre la génesis del suelo.
5. Las características típicas de suelos de selva son su extrema infertilidad y alta acidez. Junto a estas limitaciones, se ha comprobado una alta toxicidad de aluminio y escasa disponibilidad de fósforo. Por otra parte, la explotación de nutrimentos de las capas profundas del suelo por el sistema radical de los árboles, es una habilidad que no se encuentra habitualmente en cultivos agrícolas. Tal habilidad capacita a ciertas especies forestales para sobrevivir en suelos relativamente infértiles. Entre los paisajes afectados por características químicas extremas, pueden

mencionarse los manglares, los pantanos orgánicos, las turbas, los suelos afectados por procesos de podsolización y los suelos lateríticos (Oxisoles).

6. Las principales características físicas de los suelos que influyen sobre la fisionomía y la estructura de la vegetación natural en los trópicos, son: porosidad, drenaje, textura, humedad, profundidad y permeabilidad.
7. La composición biológica del suelo es de particular importancia para los procesos de descomposición de la materia orgánica y las relaciones tróficas del mismo. Entre los principales organismos del suelo se mencionan: los transformadores de compuestos nitrogenados, los oxidantes minerales, los fijadores de N_2 , los descomponedores, los predadores de fauna, los fitoparásitos y los mezcladores de detritos orgánicos.
8. Las micorrizas son elementos muy importantes en la conservación, absorción y translocación de nutrientes en el sistema radical, tanto de pluviselvas tropicales como de plantaciones forestales. Se conocen dos tipos de micorrizas: endo y ectotrófica. Esta última está casi restringida a las coníferas, mientras que la primera ocurre en muchos cultivos agrícolas y en el bosque tropical. La importancia de las micorrizas en el crecimiento vegetal fue reconocida recientemente y la "micorrización" es práctica común en los proyectos de reforestación productiva en los trópicos y subtrópicos.
9. Los dos tipos de suelos más extendidos en América Tropical son los Ultisoles y Oxisoles. Ambos son suelos antiguos, de baja fertilidad, normalmente con excelentes propiedades físicas y procesos intensos de lavado (**lessivage**). Son los más abundantes en los climas húmedos tropicales y, en muchas regiones, se hallan cubiertos de selva.

BIBLIOGRAFIA

1. ANDRIESE, J.P. 1969. A study of the environment and characteristics of tropical podzols in Sarawak (East-Malasya). *Geoderma* 2(3):201-227.
2. BUOL, S.W.; HOLE, F.; McCRAKEN, R. 1973. Soil genesis and classification. Ames. Iowa. The Iowa State University Press. 370 p.
3. CHRISTEN, H. VON; SALAS, G. DE LAS, 1965. Curso de edafología forestal. Universidad Distrital "F.J.C.". Bogotá, Colombia. 253 p.
4. CORTES, L.A.; JIMENEZ, J.; REY, J. 1973. Génesis, clasificación y aptitud de explotación de algunos suelos de la Orinoquía y la Amazonía colombiana. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. 185 p.
5. _____. 1983. Geografía de suelos de Colombia. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. 267 p.
6. _____. 1976. Taxonomía de suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá. 471 p.
7. DOUCHAFOUR, P.H. 1965. Précis de Pédologie. París. Ed. Masson. 481 p. (no consultado; citado por Malagón, 1979).
8. JANOS, D.P. 1980. Mycorrhizae influence tropical succession. *Biotropica* 12:56-64, (no consultado; citado por el NRC, 1982).
9. JENNY, H. 1941. Factors of soil formation. New York, McGraw-Hill. 270 p.

10. JORDAN, C.F. 1982. Amazon rain forest. *American Scientist* 70:394-401.
11. LUTZ, H.J.; CHANDLER, R.F. 1946. *Forest soils*. New York. Wiley & Sons. 514 p.
12. MALAGON, D. 1979. *Fundamentos de mineralogía de suelos*. Tomo II. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y tierras. Serie Suelos y Clima SC-36. Mérida, Venezuela, p. 487-747.
13. MOORMANN, F.R. 1963. Acid sulphate soils (cat clays) of the tropics. *Soil Science* 95(4):271-276.
14. NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). 1982. *Ecological and management consideration for forested lands*. Capítulo 6. Ecological aspects of development in the humid tropics. National Academy Press. Washington, p. 121-156.
15. PARISI, V. 1979. *Biología y ecología del suelo*. Barcelona. Editorial Blume. 169 p.
16. PEDRAZA, J.E. 1981. Importación bioecológica de las micorrizas. *Boletín Técnico* No. 15. p. 14-17. INCORA, Bogotá.
17. PRITCHETT, W.L. 1979. *Properties and management of forest soils* Wiley & Sons. 500 p.
18. PROYECTO RADARGRAMETRICO AMAZONAS. 1979. *La Amazonía colombiana y sus recursos*. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá.
19. SAIF, S.R. 1983. *Bibliography on vesicular-arbuscular mycorrhizae (1970-1982)*. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia. ISSN 0120-5137. 143 p.
20. SALAS, G. DE LAS. 1965. *Características, importancia y ocurrencia de los suelos forestales en Colombia*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Tesis sin publicar. 103 p. y anexos.

21. SANCHEZ, P.A. 1981. Suelos del trópico; características y manejo. Traducido del inglés por Edilberto Camacho. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Serie de libros y materiales educativos No. 48. San José, Costa Rica. 660 p.
22. SOIL SURVEY STAFF. 1962. 7a. Aproximación; un sistema comprensible de clasificación de suelo. Versión en español de Etchevehere, P.H. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina.
23. ————. 1976. Clasificación preliminar y evaluación de los sitios de la tierra baja húmeda de Colombia para el manejo forestal con especial consideración de los suelos hidromórficos. Enfoques colombianos. Ecología, Suelos del Trópico. Fundación F. Naumann. Bogotá Serie Monografías No. 8:9-103.
24. WILDE, S.A. 1958. Forest soils. New York. Ronald Press Company. 537 p.

FACTORES VEGETALES

Estructura y composición de los bosques

La estructura del bosque lluvioso primario tropical en América es, según Richards²¹, similar, en lo esencial, a la estructura de los bosques asiáticos y africanos. En los tres componentes, el bosque se compone de una estructura semejante y existe también gran similitud en su arreglo espacial. El modelo fundamental de la estructura es, pues, casi el mismo, a través de toda la extensión del bosque lluvioso.

El mencionado autor opina que, puesto que la *synusia* es un grupo de plantas similares en sus formas de vida, se puede concluir que una clasificación final y completa de la *synusiae* del bosque lluvioso no es posible en todos los casos, debido a que muchas de las especies del bosque tropical son aún desconocidas. Sin embargo, se necesita una clasificación práctica que sea válida para el momento actual, la cual debe contener un esquema aproximado y a la vez simplificado de la estructura del bosque tropical. Este esquema puede ser el siguiente (Richards ²¹):

A. Plantas Autótrofas (con clorofila)

1. plantas mecánicamente independientes

a) Árboles y arbustos

b) Hierbas

Arregladas en un número
de estratos

2. plantas mecánicamente dependientes

a) Trepadoras

b) Estranguladoras

c) Epífitas (incluyendo semiparásitas)

B. Plantas Heterotróficas (sin clorofila)

1. Saprófitas

2. Parásitas

Como se puede apreciar en el esquema anterior, no todas las formas de vida expresadas allí se encuentran en todos los bosques tropicales, así como algunas de estas formas de vida existen no solamente en el bosque húmedo tropical sino en otros tipos de bosques.

La estructura vertical del bosque húmedo tropical en su estado maduro (clímax, según la denominación de Richards²¹) ha sido objeto de numerosos estudios. Uno de los estudios más clásicos en su género es precisamente el de Richards²¹: *The Tropical Rain Forest*, a quien el autor desea remitir a los estudiosos del tema. Al citado estudio han seguido otros, realizados en los trópicos americanos, africanos y asiáticos. Vale la pena destacar los trabajos llevados a cabo en la Guyana Francesa por Oldeman¹⁹, entre otros. El estudio de la arquitectura de los árboles en el bosque tropical ha sido objeto de controversias y especulaciones. Al respecto, Oldeman¹⁹ anota: "Lo que se abre en tiempos de Julio Verne, para desarrollarse con Edgar Rice Bourroughs (autor de *Tarzán*), a través de las historietas, traduce el aspecto emocional, mitológico, que ha revestido siempre la selva sobre la mayoría de aquéllos que no la conocen más que de un modo superficial o indirecto. Este aspecto es notablemente vivaz y poderoso: la impresión de una vegetación densa, inextricable, donde todo es posible y donde todo es monstruoso, colorea inconcientemente los juicios, aún de aquellas gentes reputadas como lúcidas".

Algunas veces se ha afirmado categóricamente que existen tres estratos en el bosque lluvioso tropical, y a veces más de tres. Richards²¹ comenta que existen también autores que afirman que cualquier agrupación de árboles, de acuerdo con sus alturas, es arbitraria y que los estratos así formados no tienen una realidad objetiva. Parece que el punto de vista es compartido por Oldeman¹⁹. El problema reside en el hecho de que se ha construido una idea errónea, acerca de los llamados estratos verticales del bosque, sobre todo para aquellos que no conocen en detalle la ecología de los diferentes tipos del bosque húmedo tropical. Se piensa simplemente que las plantas leñosas pueden agruparse en tres, cuatro, cinco y a veces más clases de altura, de acuerdo con quien esté estudiando el bosque. Es posible, entonces, que los árboles de los estratos intermedios presenten alturas ligeramente diferentes; y que la mezcla de especies sea tan grande que los intervalos hipotéticos en altura nunca constituyan estratos o pisos reales. Dicha estratificación se representa normalmente por medio de un perfil que puede variar en longitud y en profundidad, de acuerdo con el investigador. En la obra de Richards²¹ aparecen varios de estos perfiles, referidos al bosque mixto de la Guyana Británica y a algunas comunidades vegetales de Asia y Africa. Oldeman¹⁹ estudió exhaustivamente la arquitectura de los bosques de la Guyana Francesa. Este autor investigó los bosques no solamente desde el punto de vista de su composición florística, sino que aportó valiosa información sobre el ensamblaje forestal, las relaciones estructurales aéreas —inclusive la geometría de estas estructuras— y las estructuras del soto-bosque, complementando sus observaciones con discusiones sobre la silvicultura y la ecología del bosque tropical. Una muestra de un perfil está representada en la Fig. 7.

La metodología para el análisis estructural de los bosques tropicales ha sido esbozada, con especial referencia a Venezuela, por Lamprecht¹⁶.

La estratificación de los bosques, en los cuales domina una sola especie o, en el mejor de los casos, dos, es mucho más simple y nítida. Es el caso, por ejemplo, de los bosques de mora (*Excelsa*) de Trinidad, especie que, según Richards²¹, alcanza una altura hasta de 58 m y forma entre el 85% y 95% de todos los árboles. Otro bosque de este tipo es mencionado por Richards²¹ y descrito como el bosque de Wallaba de la Guyana. Este bosque está dominado por la especie leguminosa *Eperua falcata*. Ejemplos similares se encuentran en Colombia y Panamá, en los bosques puros de sajo (*Camnosperma panamensis*); y en Colombia y Costa Rica en las comunidades de Cativo (*Prioria copaifera*) (ver Cap. 4).

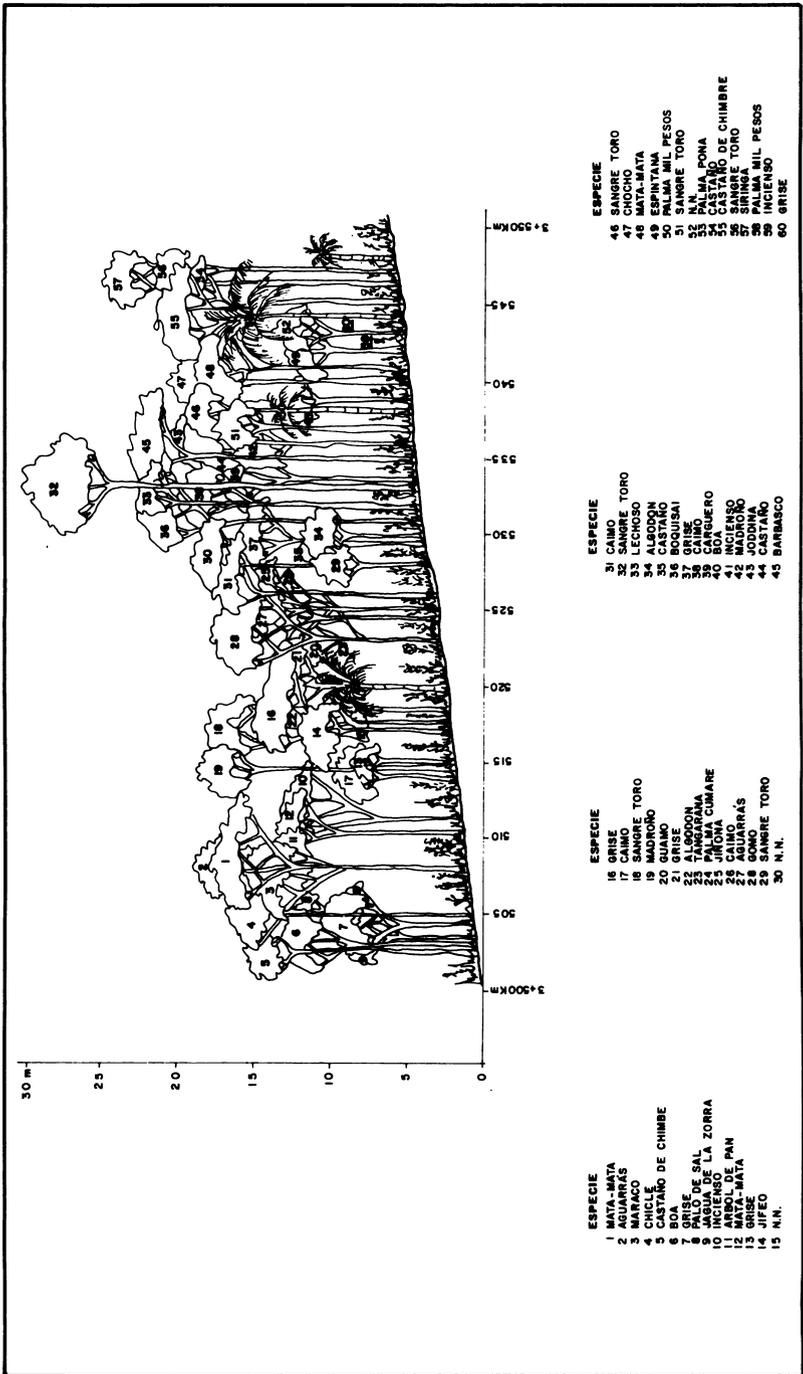


FIG. 7. Perfil de vegetación Sta. Julia-Igara-Paraná, Amazonía, Colombia. Tipo de bosque B II (Terrazas).
FUENTE: Proyecto Radargramétrico Amazonas.

El número de individuos y de especies por hectárea, en los principales tipos de bosque húmedo tropical, se resumen en los Cuadros 6 y 7.

CUADRO 6: Número de individuos por hectárea en diferentes bosques lluviosos tropicales.

Clases diamétricas (cm)	10-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	+ 80	
Sitio									
Suriname (Schulz ²⁴)	190	85	58	30	18	10	4	2-3	348
Sarawak			110		11				121
Malaya	291	144	53	29	16	9	7	3	552
Uganda	230	73	31	20	12	6	5		377
Congo	262	125	35	20	11	5			458
Nigeria	228	128	28	23	12	6	4	3	432
Guyana	226	133	55	24					438
Colombia (Carare-Opón de las Salas ²²)	445	90	46	19	6	5	2	2	615
Brunei (Borneo) (recalculado de Brüning ¹).	725	65	40	3	2	4	1	3	843

FUENTE: Dawkins^{5,6} modificado.

Cuadro 7: Número de especies por hectárea en bosques lluviosos tropicales mixtos (*mixed tropical rain forest*).

Región	Autor	No. especies/ha (árboles > 10 cm diám.)
Sarawak	Richards	130
Sarawak y Brunei	Brüning ¹	180
Guyana	Davis y Richards	178
Nigeria	Richards	152
Costa de Marfil	Aubreville	155
Khao Chong, Tailandia	Ogawa <i>et al</i> ¹⁸	67
Manaos, Brasil	Klinge y Rodríguez ¹⁴	65
Colombia	De las Salas ²²	79
Puerto Rico (Luquillo)	Wadsworth ²⁷	138

FUENTE: Richards²¹, modificado.

La composición florística, la estructura y otras características de algunos bosques de América Tropical se tratan con cierto detalle en el Cap. 10. La ecología, composición e importancia económica de los bosques de Sudamérica, se encuentra detalladamente en la obra de Hueck¹³, la cual se recomienda a quienes deséen profundizar en este aspecto.

El crecimiento de los bosques

Este aspecto es tema central de los libros de epidimetría; sin embargo, se trata aquí por considerarse de especial importancia, toda vez que se han relacionado ya las propiedades climáticas y edáficas que en la mayoría de los casos influyen en la composición y el crecimiento de la vegetación del bosque húmedo tropical.

Aunque los resultados de las investigaciones, al respecto, varían mucho de una zona a otra e incluso dentro de una misma zona climática, las relaciones entre la masa forestal y su incremento con los factores ambientales —y en primer lugar con la pluviosidad (número de meses áridos)— así como con la temperatura en las altitudes superiores, tienen que ver con la calidad del sitio. Estudios llevados por Veillon²⁶, con base en mediciones continuas de amplio récord (1956-1978), en parcelas dinámicas de crecimiento en todo el territorio de Venezuela, comprueban las relaciones anteriormente mencionadas. El Cuadro 8 resume algunos resultados de estas investigaciones.

El promedio aritmético del crecimiento medio de los fustes, deducible del Cuadro 8, es de 3.73 m³/ha/año; el crecimiento total (fustes y copas) se puede estimar en 7.5 m³/ha/año; el porcentaje anual de crecimiento en 1.6% y el crecimiento medio anual diamétrico en 0.25 cm. Los incrementos superiores se ubican en las zonas húmedas de las tierras calientes y templadas, y los inferiores en las zonas áridas y en altitudes superiores a 3000 m. Estos resultados no se salen de los márgenes de las informaciones existentes para tipos de bosques similares en otros países tropicales (Veillon²⁶).

El autor mencionado calculó también el crecimiento de parcelas dinámicas en Costa Rica, utilizando la misma metodología que en Venezuela. Los resultados de incremento no difieren de los divulgados en el Cuadro 8. Las parcelas del bosque húmedo tropical, cerca de Turrialba, enseñan un incremento de los fustes de 7.1 hasta 11.9 m³/ha/año y de 3.9 y 4.0 m³/ha/año sobre tipos de clase IV. Las

dos parcelas que ubicó en Cañas, Provincia de Guanacaste, en un tipo de bosque intervenido de transición seco-muy seco tropical, presentan un crecimiento de 1.4 hasta 2.1 m³/ha/año. Estos valores se ubican dentro de los márgenes obtenidos para Venezuela.

Los datos comparables de otros estudios dinámicos reportados en la literatura tropical son escasos, debido, como ya se indicó, a varias razones: diferentes diámetros mínimos adoptados para la medición de incrementos; cálculos de volumen con base en diferentes métodos y tablas; volúmenes buscados en diferentes zonas climáticas y fijados para límites diferentes, de acuerdo con la medición de los fustes, ramas gruesas y pequeñas, madera comercial y de leña; consideración parcial de la masa forestal, por ejemplo, con maderas comerciales explotadas únicamente, o ciertas especies de valor para el investigador; origen de los bosques; datos sobre plantaciones artificiales o bosques sometidos a planes de ordenación y regularmente explotados. Otra dificultad, para la comparación de datos, es la falta de información climática en muchos estudios. Sin embargo, parece importante reseñar algunos resultados de investigaciones relativamente comparables en algunos ecosistemas de selva tropical. El Cuadro 9 ilustra esta comparación.

CUADRO 8: Datos de crecimiento de parcelas dinámicas de tipos de bosque natural de Venezuela.

Datos por hectárea para árboles con DAP * superior a 10 cm.							
Zona de vida según Holdridge	Masa Forestal media		Productividad V. fustes (m ³ /año)				Crecimiento medio anual en DAP (cm)
	G 2 m	V 3 m	Min.	Máx.	Medio	%	
Bosque espinoso tropical	10	25	0	1	0.5	1.0	0.10
Bosque muy seco tropical	15	80	1	3	2	2.0	0.25
Bosque seco trop.	25	150	2	6	4	2.0	0.35
Bosque húmedo trop.	30	300	4	12	8	2.5	0.45
Bosque húmedo Pre-montano	35	400	4	10	7	1.7	0.25
Bosque húmedo Montano Bajo	35	300	3	6	4	1.4	0.20
Bosque húmedo Montano	40	300	2	5	3.5	1.5	0.22
Bosque húmedo Subalpino	20	50	0.3	1.3	0.8	0.8	0.20

* DAP: Diámetro medido a 1.30 m. del suelo

G : Area basal; V: Volumen.

FUENTE: Veillon²⁶, Reproducidos con permiso del autor.

Dawkins⁵ (citado por Veillón²⁶) indica que la producción total de materia leñosa en Malaya, Sudeste de Asia, no parece sobrepasar un máximo de 23 m³/ha/año en sitios excepcionales y que, en general, se ubica entre 6 y 13 m³/ha/año. Estos datos corresponden, con algunas excepciones, al incremento volumétrico de los bosques tropicales americanos, como se deduce del Cuadro 9.

Respecto al crecimiento medio anual en diámetro, existe numerosa información para varios países tropicales. El Cuadro 10 recoge algunos resultados con énfasis en bosques y especies tropicales de América.

CUADRO 9: Productividad de algunos bosques naturales tropicales.

Tipo de bosque	Sitio, País	Autor	Producción media m ³ /ha/año
Húmedo Tropical	Arena, Trinidad	Dawkins,	4.3 - 11.4
" "	El Verde, Puerto Rico	"	5.7 - 11.4
" "	Sumatra	Weck	15.9
" "	Venezuela	Veillón	11.5
Húmedo Ecuatorial	En general	Weck	5.7
Húmedo Premontano	En general	"	4.3
Húmedo Ecuatorial	Venezuela	Veillón	6.9
Húmedo Tropical	Colombia	Vásquez a/	1-3
" "	Colombia	Ladrach b/	7.7
Seco Tropical	Venezuela	Veillón	7.3
" "	En general	Weck	2.6
Muy Seco Tropical	Venezuela	Veillón	4.5
" "	En general	"	1.4
Pinares	América Central	FAO	1-8

a/ Armando Vásquez, Universidad del Tolima, Comunicación personal.

b/ Regeneración natural de cuatro años.

FUENTE: Veillón²⁶; Ladrach¹⁵; FAO¹⁰ (Datos de Veillón²⁶, reproducidos con permiso del autor).

Los Cuadros 9 y 10 están naturalmente muy incompletos, por lo que se recomienda al estudiante interesado hacer uso de la literatura especializada en el tema, es decir, consultar libros de epidemetría. Se quiso aquí tan sólo dar una idea muy global de la productividad y del crecimiento de algunos tipos y especies de bosque, de común ocurrencia en los trópicos americanos.

CUADRO 10: Crecimiento medio anual en diámetro de algunos bosques y especies tropicales americanas.

País o Lugar	Tipo de bosque Especie	Autor	Crecimiento DAP ^{a/} cm/año
Puerto Rico (Luquillo)	Natural primario	Wadsworth ²⁷	0.13
Puerto Rico ^{b/}	Parcelas dinámicas	Crow y Weaver ⁴	0.38-0.42
Puerto Rico	<i>Dydimopanax morototoni</i>	"	0.45
	<i>Ocotea leucoxydon</i>	"	0.72
	<i>Tabebuia heterophylla</i>	"	0.40
	<i>Dacryodes excelsa</i>	"	0.30
	<i>Sloanea bacteriana</i>	"	0.98
Venezuela	Natural primario	Veillón ²⁶	0.25
Venezuela	Bosque Seco Tropical	"	0.35
Colombia	Bosque de Cativo ^{c/} (<i>Prioria copaifera</i>)	Del Valle ⁷	0.48
Colombia (Bajo Calima, Butura)	Bosque primario de Colinas Bajas	Vásquez, ^{d/}	< 1
Colombia (Las Teresitas,	<i>Cariniana piriformis</i> ,	Silva ^{e/}	1.31
Río Atrato; Líneas de enriquecimiento del bosque natural)	<i>Maesopsis eminii</i>	"	2.71
	<i>Virala sebifera</i>	"	1.15
	<i>Tabebuia rosea</i>	"	1.35
Colombia (Valle M. del Magda- lena)	<i>Cariniana piriformis</i> (plantación a plena luz; 15 años)	"	1.32
Colombia, Tumaco	<i>Cordia alliodora</i> (3,25 años)	CONIF, 1983	3.5
Colombia, zona cafete- ra (Amagá)	<i>Cordia alliodora</i> (20 años) mezclada con café y árboles de sombra	Escobar y Del Valle ⁹	0.78-1.16
Suriname	<i>Cordia alliodora</i> (7 años)	Vega ²⁵	3.14
Venezuela (Llanos)	<i>Tectona grandis</i> (9 años)	Hase ¹²	2.5
Trinidad	<i>Tectona grandis</i> (5 años)	Echeverry ⁸	2.2
	(20 años)		1.35

a/ Diámetro a 1.30 m de 1 suelo; b/ únicamente las especies comerciales; c/ incremento determinado por el método de los tiempos de paso; d/ Armando Vásquez, Universidad del Tolima. Comunicación personal; e/ Jairo Silva, CONIF. Comunicación personal.

Limitaciones del crecimiento del bosque

El decrecimiento en las alturas de los ejemplares, la biomasa, la productividad, el número de formas vivientes y el número de especies puede atribuirse como primera medida al decrecimiento, tanto de la temperatura como de la actividad fotosintética (Grubb ¹¹). El mis-

mo autor comenta que el decrecimiento 0.6°C por cada 100 metros de altitud en las montañas tropicales y la importancia de los efectos de calentamiento del área foliar a plena luz, han sido ya suficientemente enfatizados. Es así como el número de horas de brillo solar diario cae de cinco y siete, en los trópicos bajos, hasta tres y seis en el bosque montano bajo lluvioso, y llega aproximadamente a tres en el bosque umbrófilo lluvioso montano. Las bajas temperaturas del aire y, menos frecuentemente, la radiación directa afectan no solamente el metabolismo foliar sino el desarrollo de flores y probablemente de frutos. Esto conduce también a una reducción de la mayoría de formas animales en el bosque. El autor comenta que no existe razón para que una humedad excesiva del suelo pueda reducir el crecimiento del bosque. Muchas de las comunidades más productivas del mundo ocurren sobre suelos con drenaje impedido. Crow³ comprobó, al estudiar cuidadosamente las variaciones en la estructura y composición de comunidades boscosas de Puerto Rico, que las tormentas tropicales pueden ofrecer explicaciones lógicas a las características juveniles del bosque. Considera que existe un amplio **espacio de crecimiento**, disponible en las primeras etapas de 1940 (este autor investigó las diferentes etapas del bosque hasta 1978). Las especies secundarias tempranas, como *Cecropia peltata*, continuaron creciendo en las parcelas que tomó como referencia, al tiempo que comprobó numerosas especies más, mientras que unas pocas de ellas se perdieron.

Por otra parte, la biomasa y el área basal del bosque se acumularon rápidamente. Withmore²⁸ comenta que los ventarrones y más frecuentemente los ciclones en el Sudeste Asiático, son causa de disturbios fuertes en el crecimiento y estructura de los bosques. Opina que cualquier bosque es un mosaico de parches en diferentes estados de madurez. De sus investigaciones en los bosques del Sudeste de Asia, concluye que el ciclo de crecimiento del bosque comienza con un claro (*gap*), y que el tamaño de esos claros determina también el tamaño de los parches en los bosques. Cuanto mayor sea el claro en la selva, el micro-clima que influye en el crecimiento del futuro bosque difiere en mayor medida de aquél que está influyendo en un bosque cerrado. Este mismo autor comprobó que las varias fases de los microclimas están interrelacionadas. Las diferencias principales entre el ambiente reinante en los claros y el de la cubierta forestal con bosque cerrado, corresponden a un aumento en luz y a un cambio en su calidad, así como a un aumento en la temperatura y en el déficit de saturación. Existe también un aumento en los nutrimentos, en la medida en que las plantas muertas se pudren; un decrecimiento temporal en

la competitividad de las raíces y, algunas veces, cambios en el microrelieve y en el perfil del suelo. La teoría de los claros en las selvas tropicales ha sido exhaustivamente estudiada por el autor mencionado; y en las selvas americanas, por autores como Sarukhan²³ (citado por Withmore²⁸), quien investigó la sucesión vegetal de una región talada en las zonas cálido-húmedas de México.

Este y otros estudios son de singular importancia, toda vez que persiguen desarrollar modelos de poblaciones, cuyos cambios, en respuesta a los factores claves que regulan el crecimiento del bosque, podrían predecirse y permitir un mejor manejo de la masa forestal.

BIBLIOGRAFIA

1. BRÜNIG, E.F. 1968. Der heidewald von Sarawak und Brunei. Mittl. d. Bundesforschungsanst. f. F. - und Holzw. Reinbek. No. 68. 151 p.
2. CORPORACION NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES. 1983. Resumen de las investigaciones sobre la especie *Cordia alliodora* (Ruíz & Pau), Oken "laurel". CONIF INFORMA No. 2. 16 p.
3. CROW, T.R. 1980. A rainforest chronicle: a 30-year record of change in structure and composition at El Verde, Puerto Rico. BIOTROPICA 12(1):42-55.
4. _____; WEAVER, P.L. 1977. Tree growth in a moist tropical forest of Puerto Rico. Forest Service Research Paper. ITF-22. Institute of Tropical Forestry. 17 p.
5. DAWKINS, H.C. 1958. The management of natural tropical highforest with especial reference to Uganda. Oxford. Imp. For. Inst. Paper No. 34. 155 p.
6. _____. 1964. Productivity of tropical forest and their ultimate value to man. p. 178-182. In The ecology of man in the tropical environment. IUCN Publ. New Series No. 4 IUCN. Morges, Switzerland.
7. DEL VALLE, J.I. 1979. Curva preliminar de crecimiento del Cativo (*Prioria copaifera*) en bosque virgen empleando el método de los tiempos de paso. Revista Facultad Nacional de Agronomía (Colombia) 32(2):19-26. 1979.
8. ECHEVERRY, R. 1976. La teca: madera preciosa de alto rendimiento para el trópico bajo. In Fundación F. Naumann. La reforestación en Colombia. Edit. Guadalupe. Bogotá, Colombia, p. 460-473.

9. ESCOBAR, L.M.; DEL VALLE, J.I. 1983. Producción de madera del nogal (*Cordia alliodora*) asociado con café en Antioquía, Colombia. Trabajo presentado en el curso sobre técnicas agroforestales. Noviembre, 1983. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 23 p. (mimeo).
10. FAO, 1982. Los recursos forestales tropicales. Estudio de Montes No. 30. 113 p.
11. GRUBB, P.J. 1977. Control of forest growth and distribution on wet tropical mountains: with special reference to mineral nutrition. Ann. Rev. Ecol. Syst. 8:83-107.
12. HASE, H. 1981. Nährstoffreserven auf Banco-Standorten der Waldreserve Caparo/Venezuela unter besonderer Berücksichtigung der Plantagenwirtschaft mit Teak (*Tectona grandis*). Disertación. Univ. de Göttingen. 152 p.
13. HUECK, K. 1978. Los bosques de Sudamérica; ecología, composición e importancia económica. Traducción de alemán de R. Brun. Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ). Rep. Fed. de Alemania, Eschborn. 476 p.
14. KLINGE, H.; RODRIGUEZ, W.A. s.f. Litter production in an area of Amazonian Terra Firme forest. Amazonian 1(4):287-310.
15. LADRACH, W. 1983. Desarrollo y tasas de crecimiento de especies latifoliadas en bosques naturales y en plantaciones en Colombia. Cartón de Colombia. Informe de investigación No. 84. 12 p.
16. LAMPRECHT, H. 1954. Ueber strukturuntersuchungen im tropenwald. Z. f. Weltforstw. 17(5).
17. ————. 1962. Ensayo sobre unos métodos para el análisis estructural de los bosques tropicales. Acta Científica Venezolana. 13(2).
18. OGAWA, H. *et al.* 1965. Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand II: Plant biomass. Nature and Life in SE-Asia. V. IV:50-80.

19. OLDEMAN, F. 1972. L'architecture de la foret guyanaise. Dissertation. Universite des Sciences et Techniques du Languedoc. Academie de Montpellier. 247 p.
20. PROYECTO RADARGRAMETRICO AMAZONAS. 1979. La Amazonía colombiana y sus recursos. Inst. Geograf. Agustín Codazzi. Talleres gráficos Italfraf, S.A. Bogotá. Vol. I. 546 p.
21. RICHARDS, P.W. 1964. The tropical rain forest. Cambridge University Press. 450 p.
22. SALAS, G. DE LAS. 1978. El ecosistema forestal Carare-Opón. CONIF. Serie técnica No. 8. Bogotá. 89 p.
23. SARUKHAN, J. 1964. Estudio sucesional de un área talada en Tuxtepec, Oax. In Contribuciones al estudio ecológico de las zonas cálido-húmedas de México. Inst. Nac. de Inv. For. México. Pub. Esp. No. 3, p. 107-72 (original no consultado; citado por Withmore, 1978).
24. SCHULZ, J.P. 1967. La regeneración natural de la selva mesofítica tropical de Suriname después de su aprovechamiento. IFLA. Boletín 23:3-26 Mérida, Venezuela.
25. VEGA, C.L. 1976. La silvicultura de *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.). Oken como especie exótica en Suriname. In Curso sobre manejo y aprovechamiento de bosques tropicales. Turrialba, Costa Rica. Febrero 2, Marzo 12. 43 p.
26. VEILLON, J.P. 1983. El crecimiento de algunos bosques naturales de Venezuela en relación con los parámetros del medio ambiente. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. Instituto de Silvicultura. Mérida, Venezuela, 122 p.
27. WADSWORTH, F.H. 1970. Review of past research in the Luquillo mountains of Puerto Rico. In Odum, H.T.; Pigeon, R.G. (eds.). A tropical rain forest, p. B. 33-46. United States Atomic Energy Commission, publ. TID-24270.
28. WITHMORE, T.C. 1978. Gaps in the forest canopy. In Boninson, P.B. and Zimmermann, M.H. (eds.). Tropical trees as living systems. Cambridge University Press, p. 639-655.

ASOCIACIONES CLIMAEDAFOZONALES DE LA VEGETACION EN AMERICA TROPICAL

ZONAS ARIDAS Y SEMIARIDAS

Por zonas áridas se entienden aquellas en las cuales las plantas acusan déficit de agua, a causa de las escasas precipitaciones y alta transpiración. Bajo estas condiciones climáticas, la cubierta vegetal es escasa y desarrolla adaptaciones a las desfavorables relaciones de agua. En estas regiones se presentan, frecuentemente, suelos salinos.

Según Walter²⁴ no existe un clima árido definido, sino tipos de clima. Los más representativos corresponden a:

regiones áridas con lluvias de invierno y un período de sequía en verano;

regiones áridas con lluvias de verano y un período de lluvias en invierno;

regiones áridas con dos períodos lluviosos o sin período lluvioso definido;

regiones extremadamente áridas con lluvias episódicas o sin lluvia.

Los ecosistemas áridos han sido mejor estudiados en Africa y Asia. Para re-

giones americanas como Colombia y Venezuela, estos paisajes se reportan como maleza desértica y monte espinoso tropical (Espinal y Montenegro⁶). Hueck¹⁵ anota que la "región costera caribeña de Colombia y Venezuela, entre el río Sinú en el occidente y la zona de Cumaná en el oriente, especialmente los alrededores del Lago de Maracaibo con las penínsulas de la Guajira y Paraguaná, está caracterizada por precipitaciones extremadamente escasas e irregulares que solamente permiten que surja un bosque seco, entremezclado con cactus o un matorral de cactus casi puro".

Las características climáticas de estas regiones son una precipitación promedio anual entre 125 y 600 mm y una temperatura media anual de 28 a 29°C. La vegetación típica de estos ambientes se reseña en el Cuadro 11.

CUADRO 11: Vegetación arbustiva característica de maleza desértica y matorral espinoso en América Tropical.

Nombre Científico	Familia	Nombre Común
<i>Pereskia colombiana</i> Br. & Rose	Cactaceae	Guamacho
<i>Prosopis juliflora</i> (Sw.) D.C.	Mimosaceae	Trupillo, cují
<i>Capparis</i> sp.	Capparidaceae	
<i>Libidibia coriaria</i> Schl.	Caesalpiniaceae	Dividivi
<i>Calotropis procera</i> Dryand.	Asclepiadaceae	Algodón lechero
<i>Croton ferrugineus</i> HBK	Euphorbiaceae	Mosquero
<i>Cnidoscolus tubulosus</i> IM.M. Johnston	Euphorbiaceae	Ortiga, pringamoza
<i>Bromelia</i> sp.	Bromeliaceae	Piñuela
<i>Lemaireocereus griseus</i> Britt & Rose	Cactaceae	Cardón
<i>Opuntia wentiana</i>	Cactaceae	Higo, tuna
<i>Melocactus communis</i> Link & Otto	Cactaceae	
<i>Bursera simaruba</i> Sarg.	Burseraceae	Indio desnudo
<i>Pithecellobium</i> sp.	Mimosaceae	
<i>Acacia farnesiana</i> Willd.	Mimosaceae	Pelá
<i>Bursera tomentosa</i> Trian. & Planch	Burseraceae	Tatamaco
<i>Jatropha gossypifolia</i> L.	Euphorbiaceae	
<i>Cephalocereus (colombianus?)</i>	Cactaceae	Cardón
<i>Opuntia</i> sp.	Cactaceae	Tuna
<i>Melocactus communis</i> Link & Otto	Cactaceae	
<i>Caesalpinia coriaria</i>	Caesalpiniaceae	

FUENTE: Espinal y Montenegro⁶ Hueck¹⁵

Del Llano¹⁷ asocia la vegetación de paisajes áridos, en Colombia, con suelos arenosos y planosólicos (alfisoles de la clasificación americana), calizos hidromórficos, litosoles, rendzinas y vertisoles.

Zonas semihúmedas y húmedas bajas

En regiones tropicales semihúmedas (2000 mm en promedio) y húmedas (2000-4000 mm), se han comprobado estrechas relaciones entre el clima, el suelo y la vegetación. Dos ejemplos muy conocidos se tienen en los **campos cerrados** del Brasil y en los Llanos Orientales colombianos.

En el Cap. 10 se definirá en detalle el paisaje de **campo cerrado** como un ecosistema de sabana. Aquí nos referimos a la dependencia climaedafozonal de este tipo de vegetación. Reis de Souza¹⁹, así como otros autores que han investigado las informaciones del **campo cerrado**, han llegado a la conclusión de que la existencia de la vegetación perennifolia está asociada a un clima caliente y húmedo, de régimen de lluvias ecuatorial, subecuatorial o tropical. Este autor opina, además, que las vegetaciones de cerrado y de monte (mata) pueden existir en un mismo tipo de clima, según las condiciones edáficas. Del mismo modo, las condiciones edáficas pueden determinar efectivamente la presencia de **manchas** o **islas** de vegetación de cerrado, con especies más o menos típicas en equilibrio ecológico; lo que demuestra que, una vez satisfecha la condición climática, la presencia del ecosistema de cerrado depende de los problemas de orden nutricional. Estas manchas se evidencian, por ejemplo, en los bosques húmedos de la Amazonía (campos de Humatá y Santarem). También se evidencian en el bosque húmedo de la costa oriental del nordeste, los cerrados de las zonas de Goiana y de Porto de Galinha, ambos en Pernambuco, los cuales constituyen verdaderas islas en medio del bosque. El Cuadro 26 caracteriza hidrológicamente estas localidades (ver Cap. 10).

En las dos localidades del Amazonía, las deficiencias hídricas se localizan en el período invierno-primavera, cuando son menores las necesidades de agua por parte de las plantas. En la zona de monte de Pernambuco, las deficiencias aparecen en el período de primavera-verano, cuando la mayor disponibilidad de energía solar demanda mayores necesidades, en términos de evapotranspiración vegetal (Reis de Souza¹⁹). Este fenómeno puede observarse, al comparar las estaciones Humaitá y Goiana. Aunque las variaciones estacionales de

los índices de humedad y aridez establecen diferencias sensibles en el régimen hídrico, estas diferencias no son tan marcadas como para causar modificaciones en la fisionomía de la vegetación. La presencia del Cerrado en el Brasil ha dado pie a varias teorías.

- a. **Falta de agua disponible en el suelo.** Varias investigaciones han demostrado que los árboles y arbustos del Cerrado tienen raíces profundas y no tienen restricciones considerables en las tasas de respiración durante períodos secos marcados, como se discutió anteriormente.
- b. **Clímax de fuego (*fire climax*).** Aunque se ha sostenido que las quemaduras continuas de un área forestal crean una pradera artificial parecida al de "campo limpio" (Budowski⁴), se ha demostrado, recientemente, que en el caso de climas húmedos y secos como los del Brasil central, el fuego no afecta el establecimiento de especies leñosas en las sabanas y que la densidad de los árboles en este ecosistema no depende básicamente del fuego (Sarmiento y Monasterio²²).
- c. **Hidromorfismo periódico.** De acuerdo con esta teoría, la vegetación de campo cerrado está parcial o totalmente sujeta a condiciones de drenaje impedido y, por lo tanto, es un resultado de esta dinámica de agua. Sin embargo, la mayoría de la vegetación de cerrado ocurre en suelos altamente porosos, muy profundos y bien drenados (Lopes y Cox¹⁶).
- d. **Escleromorfismo oligotrópico.** Esta teoría se fundamenta en que las plantas del cerrado tienen un suministro adecuado de luz, agua y aire, pero una falta de nutrientes asimilables, lo cual conduce a una insuficiencia en la síntesis de proteínas y consecuentemente a un crecimiento subnormal. Aunque la escasez de nutrientes disponibles es muy conocida en el paisaje de Cerrado en el Brasil, existen muy pocos estudios que comparan específicamente las propiedades del suelo con las varias características de la vegetación, y solamente un estudio ha incluido los suelos bajo bosque para comparación (Alvim y Araujo, citados por Lopes y Cox¹⁶). Una correlación significativa entre el área basal por hectárea y los niveles naturales de N, P y K ha sido encontrada, pero no una correlación con el porcentaje de carbono, pH, calcio más magnesio, aluminio o porcentaje de arcilla para estos suelos (Goodland y Pollard, citados por Lopes y Cox¹⁶).

- e. **Escleromorfismo por toxicidad de aluminio.** Esta es un complemento de la teoría anterior y establece que los altos niveles de Al intercambiable en el suelo frenan la disponibilidad de P, Ca, Mg, N y K y posiblemente de otros nutrimentos (Goodland¹⁰).

De las cinco teorías mencionadas, las dos últimas son las más aceptadas entre botánicos, ecólogos, fisiólogos y edafólogos (Lopes y Cox¹⁶). Se cree que existen condiciones edáficas críticas que inhiben el desarrollo del bosque, en favor de la vegetación de cerrado. Lopes y Cox¹⁶ comprobaron que existe una correlación positiva entre la vegetación y las siguientes propiedades del suelo: pH en H₂O, pH en KCl, Ca, Mg y K intercambiables, P, Zn, Cu y Mn. En otras palabras, cuando estos parámetros aumentaron, se comprobó un aumento en la densidad y altura de la vegetación leñosa. No hubo diferencia en el nivel de aluminio entre los cinco tipos de vegetación (campo limpio, campo cerrado, cerrado, cerrado y bosque) analizados. Sin embargo, la saturación de Al decreció significativamente del *campo limpio* al bosque semidecidual. Los autores anteriores encontraron, también, que los tipos **campo limpio** y **campo cerrado** ocurrían más frecuentemente en suelos de pardo a pardo oscuro, mientras que la vegetación más alta (cerrado y bosque) ocurría típicamente en suelos de pardo rojizo oscuros a rojo amarillentos.

Los tipos de suelos más extendidos en el paisaje de Cerrado corresponden a *Latosol Vermelho Amarelo* y *Latosol Vermelho Escuro* (Ranzani¹⁸).

Las influencias edafo-antrópicas y climáticas en el paisaje de sabana de los Llanos Orientales colombianos, fue estudiada por Blydenstein⁵. Este autor comenta que varios geógrafos, entre ellos Gribenbach, ubican a este tipo de paisaje dentro del denominado **clima de pradera**. Los datos climáticos para los Llanos de Colombia muestran una variación de lluvia anual que oscila entre menos de 100 mm y más de 3000 mm/año, con una estación seca que varía en longitud, desde un mes en el sur hasta seis meses en el nordeste. Las sabanas de los llanos están rodeadas de vegetación boscosa, la mayoría decidual. A través de la variación climática anotada, no se han comprobado cambios apreciables en el macroclima del límite de la formación bosque-sabana.

La teoría de colocar el clima como un factor primario en la formación de sabanas puede, según Blydenstein⁵, descartarse, toda vez que un mayor número de datos climáticos recientes se encuentran

disponibles, los cuales muestran que una secuencia de climas siempre secos no coincide con la misma secuencia de formaciones vegetales, incluyendo la sabana; más bien coincide con una secuencia de formaciones boscosas, que aumenta a medida que la adaptación a las condiciones xerophíticas aumenta también. Ambas formaciones, la de sabana y la de bosque decíduo, se adaptan bien a un régimen alterno de estaciones secas y húmedas; y su presencia en un sitio particular depende de otros factores del ecosistema total, los cuales pueden favorecer una u otra formación. Blyndestein⁵ opina que cualquier factor ambiental que tienda a crear un habitat más húmedo, en forma temporal en un clima seco, o un habitat más seco, en un clima húmedo, hará posible el desarrollo de vegetación de sabana, bajo condiciones diferentes del clima tropical húmedo y seco propiamente dicho.

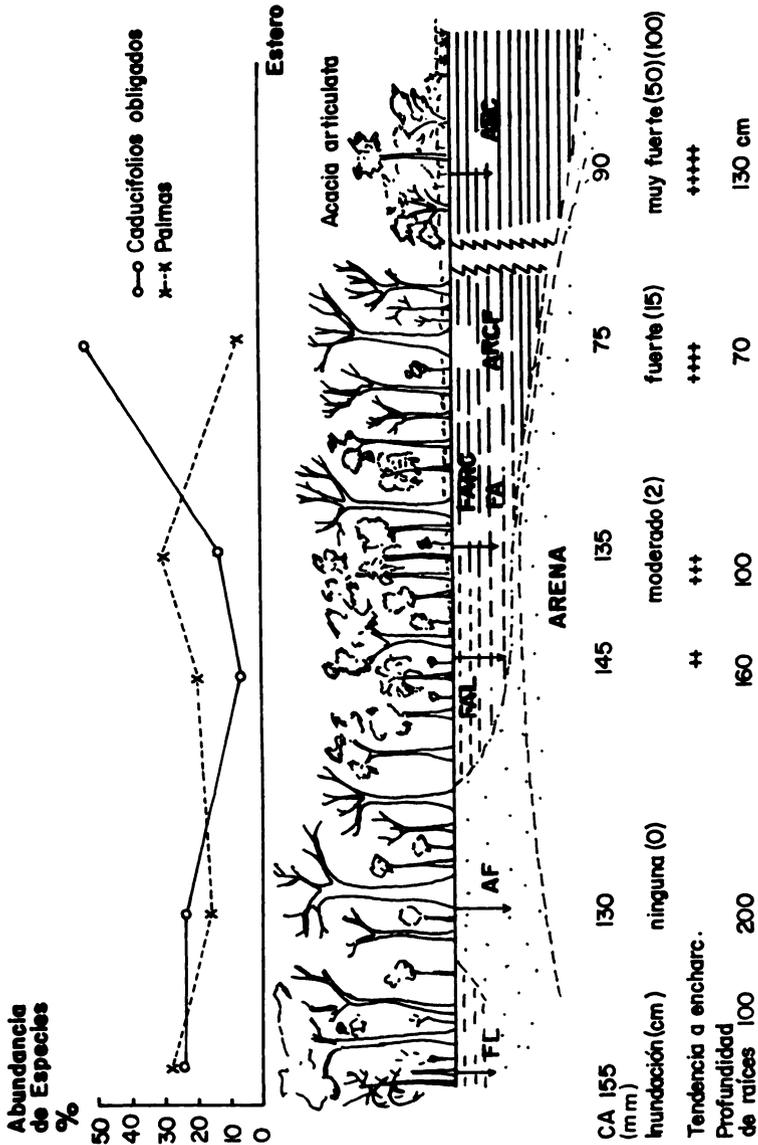
La influencia del suelo para este tipo de paisaje ha sido reconocida desde hace muchos años. Beard² coloca la sabana al final de una serie de formaciones edáficas.

El desarrollo del suelo sobre topografías planas, bajo climas húmedos, conduce a menudo a la formación de un drenaje impedido. En lugares donde el clima tiene períodos secos y húmedos alternos, se llega a una condición de hidromorfismo y disecación del perfil del suelo y de la zona radical. Este fenómeno ha sido observado por varios investigadores en América Tropical: por ejemplo, en los suelos de Cuba, por Bennett y Allison (citados por Blyndestein⁵), Beard² en Trinidad y Venezuela, Franco⁹ en Venezuela y Foelster y De las Salas⁸ en Colombia. Blyndestein⁵ afirma que el drenaje impedido por sí mismo no previene el desarrollo del bosque, aunque las sabanas son más comunes en sitios con drenajes naturales pobres.

El drenaje impedido ha sido calificado por los autores anteriores como el problema ecopedológico central en vastas regiones de baja humedad del trópico americano. El estancamiento del agua y la escasa penetración de las raíces, por un lado, y la falta de agua periódica pero irregular, por el otro, limitan la producción vegetal. La diferenciación de los tipos de vegetación corre paralela con los gradientes de homogeneidad en el suministro de agua y, en primer lugar, con la pendiente en algunos casos. En la región del Carare-Opón (De las Salas²¹), por ejemplo, el desplazamiento de poros medios a finos no obedece tanto a un cambio textural, cuanto a un aumento del encharcamiento, y corre paralela con éste. Esta secuencia —aumento de saturación/disminución de poros medios— confirma el principio

(cualitativamente conocido) de que la sobresaturación, sea por agua lateral o por agua estancada en sedimentos compactos, causa una compactación secundaria del suelo, la cual actúa entre otras cosas "engrosando" la densidad de las partículas de arcilla y "consumiendo" con ello la proporción de poros medios. En este punto, adquiere un gran significado el escaso enraizamiento del subsuelo por un lado y la fluctuación permanente del agua por otro. Para ilustrar la influencia del suelo sobre la distribución de la vegetación, se ha tomado como ejemplo un sitio de los Llanos Occidentales de Venezuela. Este sitio pertenece a la reserva forestal de Caparo, Estado Barinas. El sitio se caracteriza por lluvias de 1750 mm anuales y una temperatura promedio anual de 24.6°C (Franco⁹). La Fig. 8 representa en este paisaje la distribución de la vegetación a través de un gradiente edáfico (hidromorfismo). En dicha figura, se ha puesto como determinante la aireación del suelo. Las texturas varían de francolimosas (FL), pasando por arenofrancosas (AF), francoarcillolimosas (FAL), francoarcillosas (FArc), hasta totalmente arcillosas (Arc). Este cambio de texturas ocasiona cambios igualmente en la capacidad de almacenamiento (CA) de agua del suelo superior. Esta se evidencia en la figura, con tasas que disminuyen de 155 mm hasta 90 mm para el suelo arcilloso. Igualmente, la figura destaca la inundación de este paisaje y su grado (0 a 100). La figura también trae en su parte superior un esquema que relaciona la abundancia de especies arbóreas y su hábito de botar hojas (caducifolia). Franco⁹ clasificó el fenómeno en tres grados, según su índice de caducifolia: a) de 0 a 33%: bosque subsiempre verde; b) de 33 a 66%: bosque semidecídúo; c) de 66 a 100%: bosque decídúo. El hábito de caducifolia de las especies arbóreas de este paisaje particular, obedece preferentemente a condiciones edáficas. Tal aspecto se trata con cierto detalle en el Cap. 13. Para la región noreste del Mato Grosso, Brasil, Foelster y Fassbender⁷ hacen referencia a estudios realizados por Askew y colaboradores, quienes demuestran que existe una zona de transición entre el bosque lluvioso semidecídúo y la sabana (sabana húmeda). Generalmente se presenta el bosque lluvioso sobre areniscas y la sabana sobre piedras ricas en arcilla. La pradera natural se presenta, según los autores anteriores, en el dominio de los suelos hidromórficos (*Pseudogleys*), mientras que los bosques de Galería se presentan sobre *Gleys* (suelos hidromórficos afectados por agua de fondo).

La precipitación en este ecosistema alcanza alrededor de los 1300 mm. Para un tipo de paisaje más húmedo, mayor de 3000 mm de precipitación, en Colombia, von Christen²³ diferencia dos subpaisajes típicos: a) pantanos orgánicos y b) pantanos no orgánicos, ambos característicos de vegetaciones boscosas diferentes en la costa



Distribución de la vegetación a través de un gradiente edáfico.
FUENTE: Foelster y Fassbender 7.

pacífica y en la región de Urabá, respectivamente. El bosque de los pantanos orgánicos se denomina comúnmente Guandal o Mangual y corresponde a una asociación homogénea de dos especies principales: Cuángare (*Dialyanthera gracilipes*) y Sajo (*Camposperma panamensis*). Estas dos especies suman aproximadamente el 95% de la composición florística del bosque. Otras especies que acompañan generalmente este tipo de bosque son las siguientes: Anime (*Protium neglectum*), Caimitillo (*Chrysophyllum sp.*), Chalviande (*Virola reidii*), Chanul (*Humirastrum procerum*), Machare (*Symphonia globulifera*), María (*Calophyllum mariae*), Mascarey (*Hieronyma chochoensis*), Palmicha (*Euterpe sp.*), P. naidí (*Euterpe cuatrecasana*), Peine mono (*Apeiba aspera*), *Compsonaura sp.* En la medida que disminuye la tierra firme y el paisaje se hace más pantanoso (saturado todo el año), se encuentra un bosque puro de Sajal, compuesto por la especie sajo. Este bosque, según estudios de Alonso,¹ representa un rendimiento maderable muy alto (50 m³ a partir de 40 cm de diámetro/ha). Los ejemplares alcanzan diámetros de hasta 70 cm y alturas de hasta 30 m. Este tipo de bosque puede estar mezclado con diferentes especies de palmas, entre las que se destaca la palma Naidí (*Euterpe cuatrecasana*). Cuando se intervienen (explotación maderera) los bosques de Mangual y Sajal aparece la formación denominada Naidizal, compuesta por la palma ya mencionada. Este tipo de bosque se presenta siempre en paisajes inundados. En el Cap. 10 se menciona la importancia de las palmas en el trópico húmedo (producción de palmito para la industria). Finalmente, dentro del gradiente hidromórfico, se presenta la formación del manglar, cuyas condiciones específicas tienen que ver con la influencia del agua dulce y del agua salada. Una descripción de este ecosistema está fuera de los objetivos del presente capítulo. Los pantanos no orgánicos están representados por la asociación denominada Catival, cuya especie representativa es el cativo (*Prioria copaifera*). Se distinguen usualmente dos asociaciones, que dependen de un gradiente edáfico: el catival de tierra firme y el catival de pantano. El primero generalmente está compuesto por cinco o más especies, las cuales acompañan al cativo (*Pterocarpus officinalis*, *Carapa guianensis*, *Virola spp.*, *Spondias mombin*, *Anacardium excelsum*). Esta asociación de tierras firmes está caracterizada por suelos aluviales del tipo *fluentic tropacuept*, mientras que el catival de pantano está asociado con suelos hidromórficos del tipo *Aquic fluentic eutropets*. Al igual que los bosques de Guandal, este tipo de bosque presenta una importancia económica muy grande. Se ha medido el mayor volumen maderable en bosques homogéneos, en los cativales (250 m³ /ha para diámetros mayores de 30 cm).

Para el ecosistema de sabana de los Llanos Orientales colombianos, Blyndestein⁵ comprobó una distribución de los diferentes tipos de sabana de acuerdo con las características de los suelos. En el nivel de grandes grupos de suelos, el autor citado encontró el tipo de suelo de *Andropogon* sobre suelos Inceptisoles (*Ochraquepts*). En este mismo tipo de suelo, se encontraron los bosques de Galería. La asociación compuesta por *Trachypogon vestitus*/*Axonopus purpusii* se localizó sobre suelos del tipo Orthents, mientras que *Trachypogon vestitus* se limitó en su mayoría completamente al grupo de los Latosoles. La descripción de este ecosistema de sabana se presenta en el Cap. 10.

De manera general, el significado ecológico del drenaje puede resumirse así: en suelos Gley-morfos, la altura promedio de la napa freática determina la profundidad del enraizamiento (el volumen de suelos aprovechable), por causa de una posible limitación del suministro de oxígeno al sistema capilar, el cual varía según la proporción de poros grandes. Las fluctuaciones del agua de fondo inciden en el flujo homogéneo del suministro de agua, lo cual es peligroso en el caso de que existan profundos descensos en el nivel de agua freática, sobre todo en tiempo de sequía. Esta es la regla en la mayoría de los suelos con agua estancada —*Pseudogleys*—, que poseen una capacidad de almacenamiento de agua muy reducida. El fenómeno normal en los *Pseudogleys* es carencia de aire, exceso de oferta de agua en ciertos períodos, carencia de agua en otros y una relativamente escasa capacidad de infiltración en el suelo del horizonte inferior (Foelster y Fassbender⁷).

Von Christen²³ comenta que la vegetación de sitios influenciados por agua de fondo es muy diferente. Atribuye este hecho, en primer lugar, al contenido de oxígeno fuertemente variable del agua de un sitio a otro y al suministro irregular de la misma. Opina, además, que las sustancias orgánicas disueltas en el agua estimulan el proceso de reducción y causan un suministro deficiente de oxígeno para las raíces. La presencia de agua de fondo, rica en humus y de coloración café parduzco, está generalmente asociada con suelos y materiales parentales pobres en nutrimentos y fuertemente ácidos. El bosque que cubre tales sitios es casi siempre de una producción baja. Por el contrario, un agua de fondo de color claro, indica un suministro suficiente de oxígeno para los árboles, ya que los ácidos húmicos, que tienen un efecto reductor, no están presentes.

El efecto del fuego sobre la formación de sabanas y sobre la distribución del bosque fue discutido para el caso del campo cerrado en el Brasil y es válido también para los ecosistemas de sabana de los Llanos Orientales colombianos y venezolanos. Sin embargo, varios autores, entre ellos Blyndestein⁵ y Budowski⁴ opinan que algunos relictos de bosques esparcidos en las sabanas han estado protegidos de fuegos recurrentes por más de diez años. Esto se debe probablemente a la resistencia al fuego de varias semillas y a la escasa vulnerabilidad de plántulas vigorosas, que aseguran una regeneración abundante y el restablecimiento de las especies. Algunas especies representativas de estos arbustos son: *Curatella americana* y *Carapa llanorum*. Blyndestein⁵ indica que la presencia de estas dos especies evidencia que el fuego ha influido en este tipo de vegetación por un largo período, probablemente desde antes del arribo del hombre al continente americano. Por último, la duda de si existe un **clima de sabana** ya había sido despejado por Richards²⁰, cuando se refirió a los tipos de vegetación en los trópicos húmedos con relación a los suelos. Esta misma opinión es compartida por Reis de Souza¹⁹, quien aclara este concepto para el campo cerrado, discutido anteriormente.

Zonas montanas húmedas

En las montañas tropicales existe una correlación entre la latitud y la vegetación, la cual no solamente se restringe a la dependencia de la altura con respecto a la disminución de temperatura, sino que también expresa una relación entre la variación de altura y la precipitación y la radiación solar. Independientemente de las condiciones climáticas de la tierra baja tropical, se encuentra, a determinada altitud —generalmente entre 1500 y 3500 m— una zona con fuerte formación de nubes, es decir, con una gran periodicidad de niebla, una mayor humedad relativa del aire y una menor duración de la luz solar. Generalmente existe, por debajo de este tipo térmico, un bosque de cordillera bien desarrollado, el cual intergrada hacia altitudes menores en un bosque lluvioso siempre verde o en una formación boscosa más seca. El bosque del cinturón de niebla (bosque montaño, bosque nublado, bosque de musgo) es un tipo de bosque rico en epífitas y musgos, pero a menudo con una estructura muy baja de ejemplares, que depende ciertamente de la altitud misma, de la duración de las horas de luz y de otros factores. De las Salas²¹ y von Christen²³ observaron en Colombia bosques casi puros de aliso (*Alnus jorullensis*), que exhibían todas las características de un bosque

de musgo. Los mismos autores estudiaron el tipo de humus de este sitio en Colombia (Departamento de Nariño, 2800 m, con dominancia de especies como el *encenillo*); este tipo de humus corresponde al moder y muestra a menudo bandas de hierro como indicadoras de un proceso de podzolización. El horizonte orgánico medido en varios sitios representativos fue aproximadamente de 50 cm.

Para ilustrar la correlación entre la vegetación natural y el suelo (dependencia edafoclimática), se tomó como ejemplo el bosque nublado de La Carbonera, en Venezuela (ver descripción de este ecosistema en el Cap. 10). Esta dependencia está representada en el Cuadro 12.

CUADRO 12: Distribución del volumen maderable como dependiente del sitio con reservas nutricionales, para comparación (ecosistema de bosque nublado de La Carbonera, Venezuela).

Parámetros	Tipos de Sitio					
	1	2	3	4	5	6
Volumen (m ³ /ha)	500	490	665	370	200	150
Ara basal (m ² /ha)		44.7	48.4	37.1	25.4	18.1
Reservas minerales en la vegetación (Kg/ha)						
N		1157	1228	949	873	
P		69	73	57	52	
K		1462	1672	1200	1019	

FUENTE: Hetsch¹³; Grimm y Fassbender¹² (adaptado).

Del Cuadro 12 se deduce claramente que hay una influencia del sitio sobre el volumen, el área basal y las reservas minerales. Estos parámetros disminuyen del sitio 2 al 5 con la sola excepción del sitio 3, el cual posee el máximo volumen y, por lo tanto, las mayores reservas. Una breve caracterización de estos sitios aclara la dependencia:

- Sitio 1:** pendiente superior a 25°, suelo superior arcilloso (más del 50%), susceptible a la erosión;
- Sitio 2:** menor pendiente, sin agua estancada, menor contenido de arcilla del sedimento de ladera;

- Sitio 3:** buena actividad biológica y reservas nutricionales, agua estancada sólo periódicamente;
- Sitios 3 y 4:** disminución de la profundidad de raíces, aumento de la influencia de agua estancada y de un horizonte A (álbico);
- Sitios 5 y 6:** agua estancada como factor decisivo y limitativo de la actividad biológica; fuerte disminución de la profundidad de raíces; la mayor parte del año, suelo saturado.

Las características anteriores permiten concluir que el agua y su dinámica en el perfil constituyen el factor más importante de diferenciación de los sitios.

Para el mismo ecosistema de La Carbonera, Hetsch¹³ estableció que a una saturación de agua del suelo más alta (escasa evapotranspiración) y una mayor actividad de los ácidos orgánicos, predominaba una fuerte acidificación, con alto porcentaje de aluminio intercambiable y óxidos de Al (6-8%) en los primeros 50 cm.

Las variaciones altitudinales que dependen del clima (precipitación, evapotranspiración) fueron estudiadas por Herrmann¹², a través de un transecto desde las nieves perpetuas hasta el nivel del mar, en el paisaje norte de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. Estas variaciones en los parámetros climáticos, junto con la tasa de esorrentía y el transcurso de la humedad del suelo a través del año, fueron representadas por este autor esquemáticamente. La Fig. 9 ilustra estas variaciones, expresadas para cuatro tipos de bosque.

En la Fig. 9 vale la pena indicar dos extremos: el bosque nublado permanece saturado todo el año (pF menor de 1.8), mientras que el bosque seco deciduo de bajura consume toda el agua (450 mm) que recibe (evapotranspiración real 450 mm). Con ello, existe siempre un déficit de agua (pF mayor de 3.5) e inclusive una condición de marchitamiento o de marchitamiento permanente (pF mayor de 4.2 en el período comprendido entre diciembre y abril). Sin embargo, es conocido que este tipo de clima condiciona una vegetación xerofítica y cracicaule, la cual se adapta perfectamente a estas condiciones extremas de precipitación (ver Cuadro 11).

RESUMEN

1. Las regiones áridas y semiáridas, semihúmedas y húmedas bajas y montañas húmedas de América Tropical, se caracterizan brevemente.

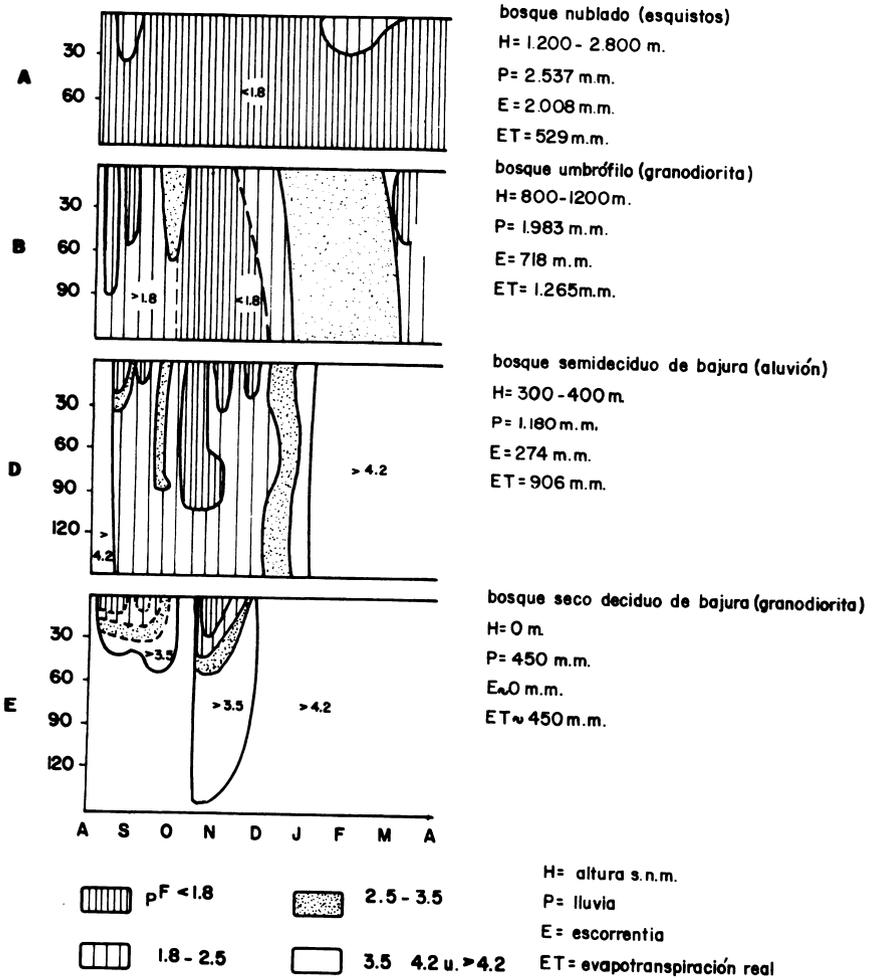


FIG. 9. Balance hídrico y variación de la humedad del suelo en función de la altitud para cuatro tipos de bosque. Sierra Nevada de Sta. Marta, Colombia.

FUENTE: Herrmann¹².

2. Se discuten las relaciones entre el clima, el suelo y la vegetación, con base en dos ejemplos muy conocidos: los Campos Cerrados del Brasil y los Llanos Orientales de Colombia.
3. Las variaciones estacionales de los índices de humedad y aridez establecen diferencias sensibles en el régimen hídrico, pero éstas no son tan marcadas como para causar modificaciones en la fisionomía de la vegetación.
4. La presencia del **cerrado** en el Brasil ha sido objeto de varias teorías: a) falta de agua disponible en el suelo; b) clímax de fuego (*fire climax*); c) hidromorfismo periódico; d) escleromorfismo oligotrópico y e) escleromorfismo por toxicidad de aluminio. De estas cinco, las dos últimas son las más aceptadas por botánicos, ecólogos, fisiólogos y edafólogos.
5. Los tipos de suelos más extendidos en el paisaje de cerrado corresponden al *Latosol Vermelho Amarelo* y al *Latosol Vermelho Escuro*.
6. Las influencias edafotrópicas en el paisaje de sabana han sido reconocidas desde hace mucho años por varios ecólogos, entre ellos Beard, quien coloca la sabana al final de una serie de formaciones edáficas. En cambio, la influencia climática en la formación de sabanas ha sido cuestionada y aún descartada, ya que evidencias recientes muestran que una secuencia de climas siempre secos no coincide con la misma secuencia de formaciones vegetales, incluyendo la sabana; más bien coincide con una secuencia de formaciones boscosas, que aumenta a medida que la adaptación a las condiciones xerofíticas aumenta también. Ambas formaciones, la de sabana y la de bosque decíduo, se adaptan bien a un régimen alterno de estaciones secas y húmedas y su presencia en un sitio particular depende de otros factores del ecosistema, los cuales pueden favorecer a una u otra formación.
7. El drenaje impedido ha sido calificado como el problema ecopedológico central en vastas regiones de bajura del trópico húmedo americano. La influencia del suelo (gradiente edáfico) sobre la distribución de la vegetación, se ilustra con ejemplos de los Llanos Occidentales de Venezuela y con las asociaciones de bosque húmedo Guandal y Catival en Colombia. De manera general, el significado ecológico del drenaje se resume en la carencia de oxígeno para las raíces, exceso de oferta de agua en cier-

tos períodos, carencia en otros y una escasa capacidad de infiltración en el suelo del horizonte superior.

8. La correlación entre la vegetación natural y el suelo y entre aquélla y la variación climática (precipitación, evapotranspiración), se ilustra para los casos de un bosque nublado montano en Venezuela y de la Sierra Nevada de Santa Marta en Colombia, respectivamente.

BIBLIOGRAFIA

1. ALONSO, M.C. 1965. Estudio preliminar de los bosques de guandal de la Costa del Pacífico en el Departamento de Nariño, Colombia. Tesis de Grado Ing. For. Universidad Distrital "F.J.C.". 98 p.
2. BEARD, J.S. 1953. The savanna vegetation of northern tropical America. *Ecological Monographs* 23:149-215.
3. ————. 1965. The classification of tropical American vegetation types. *Ecology* 36:89-100.
4. BUDOWSKI, G. 1956. Tropical savannas, a sequence of forest felling and repeat burnings. *Turrialba* 6:23.33.
5. BLYNDESTEIN, J. 1967. Tropical savanna vegetation of the Llanos of Colombia. *Ecology* 48:1-15.
6. ESPINAL, L.S.; MONTENEGRO, E. 1963. Formaciones vegetales de Colombia; memoria explicativa sobre el mapa ecológico. Instituto Geográfico "Agustín Codazzi". Bogotá, 201 p.
7. FOELSTER, H.; FASSBENDER, H.W. 1978. Oekopedologische Grundlagen der Bodennutzung in den Tropen und Subtropen. Universität de Göttingen, Fakultät Forestal. Vorlesungsmanuskript. 161 p.
8. ————; SALAS, G. DE LAS. 1974. Wasser als minimum factor im regenwald. *Mittl. de. Deutsch. Bodenkundl. Ges.* 20.
9. FRANCO, W. 1979. Die Wasserdynamik einiger Waldstandorte der West-Llanos Venezuelas und ihre Beziehung zur Saisonalität des Laubfalls. Dissertation. Univ. Göttingen. 201 p.

10. GOODLAND, R. 1971. Oligotrofismo e aluminio no cerrado. p. 44-60. In M.G. Ferri (Coord.). III Simposio sobre o cerrado. São Paulo. Editora Edgar Blücher Ltda. 239 p.
11. GRIMM, U.; FASSBENDER, H.W. 1981. Ciclos biogeoquímicos de un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. In *Inventario de las reservas orgánicas y minerales (N, P, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Al, Na)*. Turrialba 31(1):27-36.
12. HERRMANN, R. 1970. Vertically differentiated water balance in tropical highmountains with special reference to the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. Proc. Int. Assoc. Sci. Hydrol, p. 263-273.
13. HETSCH, W.; HOHEISEL, H. 1976. Standorts-und vegetationsgliederung in einem tropischen nebelwald. Allg. Forst-U. J. Ztg. 147(10/11):201-209.
14. HETSCH, W. 1976. Die biezienung von niederschlag und bodenbildung in der Andenkordillere Venezuela. Dissertation. Univ. Göttingen. 167 p.
15. HUECK, K. 1978. Los bosques de Sudamérica; ecología, composición e importancia económica. Traducido del alemán por R. Brun. Sociedad Alemana de Cooperación Técnica, GTZ. Eschborn. 476 p.
16. LOPES, A.S.; COX, F.R. 1977. Cerrado vegetation in Brasil: an edaphic gradient. *Agronomy Journal* 69:828-831.
17. LLANO, M. DEL; LLANO, H. DEL. 1964. Los suelos y su vegetación en los principales medios geofísicos de un país modelo en el mundo: Colombia ecuatorial. Atlas de Economía Colombiana. 4a. entrega. Banco de la República. 52 p.
18. RANZANI, G. 1971. Solos do cerrado no Brasil. p. 26-43. In M.G. Ferri (Coord.). III Simposio sobre o cerrado. São Paulo, Editora Edgar Blücher Ltda. 239 p.
19. REIS DE SOUZA, C.A. 1971. Climatologia dos cerrados. p. 15-25. In M.G. Ferri (Coord.). III Simposio sobre o cerrado. São Paulo, Editora Edgar Blücher Ltda. 239 p.

20. RICHARDS, P.W. 1961. The types of vegetation of the humid tropics in relation to the soil. In *Tropical soils and vegetation; proceedings of the Abidjan Symposium*. UNESCO. 1961.
21. SALAS, G. DE LAS. 1978. El ecosistema forestal Carare-Opón. Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal. Bogotá, serie técnica No. 8. 89 p.
22. SARMIENTO, G.; MONASTERIO, M. 1975. A critical consideration of the environmental conditions associated with the occurrence of Savanna Ecosystems in tropical America. p. 223-250. In Golley F.B. y Medina E. (eds.). *Tropical Ecological Systems-Trends in Terrestrial and Aquatic Research*. New York, Heidelberg, Berlin. Springer.
23. VON CHRISTEN, H.C. 1976. Clasificación preliminar y evaluación de los sitios de la tierra baja húmeda de Colombia para el manejo forestal, con especial consideración de los suelos hidromórficos. *Enfoques Colombianos; Ecología. Suelos del Trópico*. Fundación F. Naumann. Serie Monografías No. 8. Bogotá, p. 9-103.
24. WALTER, H. 1964. Die vegetation der erde in oeko-physiologischer betrachtung. I Die tropischen und subtropischen zonen, p. 305-307, 310-320. Stuttgart. Fischer Verlag.

PARTE II

**EL ECOSISTEMA
FORESTAL**

EL CONCEPTO DE ECOSISTEMA

En 1877, Mobius publicó un estudio clásico acerca de **una cama de ostras**; la describió como una *biocenosis*, para destacar la forma en que las plantas y los animales interactúan entre sí en la comunidad. Tansley, un botánico, introdujo el concepto en Gran Bretaña, cuando tradujo *biocenosis* como **ecosistema**. Entonces, el término **ecosistema** automáticamente sugiere que existe un **sistema**, en el cual plantas y animales reaccionan las unas frente a los otros y reaccionan también frente al ambiente físico.

Las comunidades planta-animal desarrolladas en grupos o asociaciones pueden considerarse como un ecosistema. El término se ha usado también para describir las inmensas comunidades de bacterias invisibles y de hongos que se desarrollan sobre la superficie de las hojas. Pero parece más lógico identificar estos **ecosistemas en miniatura** como sub-sistemas dentro de ecosistemas (Cousens ¹).

La estructura principal de un ecosistema vegetal está compuesta por sus plan-

tas. Sus partes aéreas y raíces se definen como sus límites verticales. Al investigador le interesa tal estructura, en la medida en que aspira a conocer su funcionamiento. En general, el sistema supone:

- (I) la degradación completa de un compuesto orgánico a uno inorgánico, con gasto de energía;
- (II) la relación funcional entre formas de vida, dependientes entre sí.

La mayoría de ecosistemas dependen, para su funcionamiento, de organismos autotróficos (plantas verdes), que atrapan energía radiante.

Por complejo que sea un ecosistema, en él operan dos procesos fundamentales:

1. la síntesis de la materia orgánica (biosíntesis);
2. la biodegradación de la biomasa y de la materia orgánica muerta (con pérdida de calor y energía y circulación de compuestos inorgánicos).

El sistema puede cuantificarse en equivalentes calóricos de biomasa, unidades de energía, unidades de peso y otros. Puesto que la energía no se pierde sino que se transforma, es necesario hacer un balance de las reservas energéticas. Si se utiliza un enfoque energético, la energía debe entenderse como un flujo en el ecosistema (dentro y fuera de él). Los flujos energéticos son apenas un derivado de los dos procesos fundamentales enunciados anteriormente.

La biodegradación deja libres los compuestos inorgánicos requeridos, para biosíntesis posteriores a cargo de organismos autótrofos, lo cual resulta en el **ciclo de nutrimentos**. Las pérdidas y ganancias de bioelementos en el ecosistema deben —teóricamente— estar balanceadas. Este hecho permite al sistema su funcionamiento, mientras continúen los flujos energéticos.

Componentes del (eco)sistema

En lo planteado quedó claro que cualquier sistema debe tener una estructura y una función. La estructura está armada por componentes que se interrelacionan o interactúan (función) entre sí. Todo sistema posee: componentes, interacciones entre ellos, entradas, salidas y límites. La Fig. 10 ilustra este concepto para el bosque.

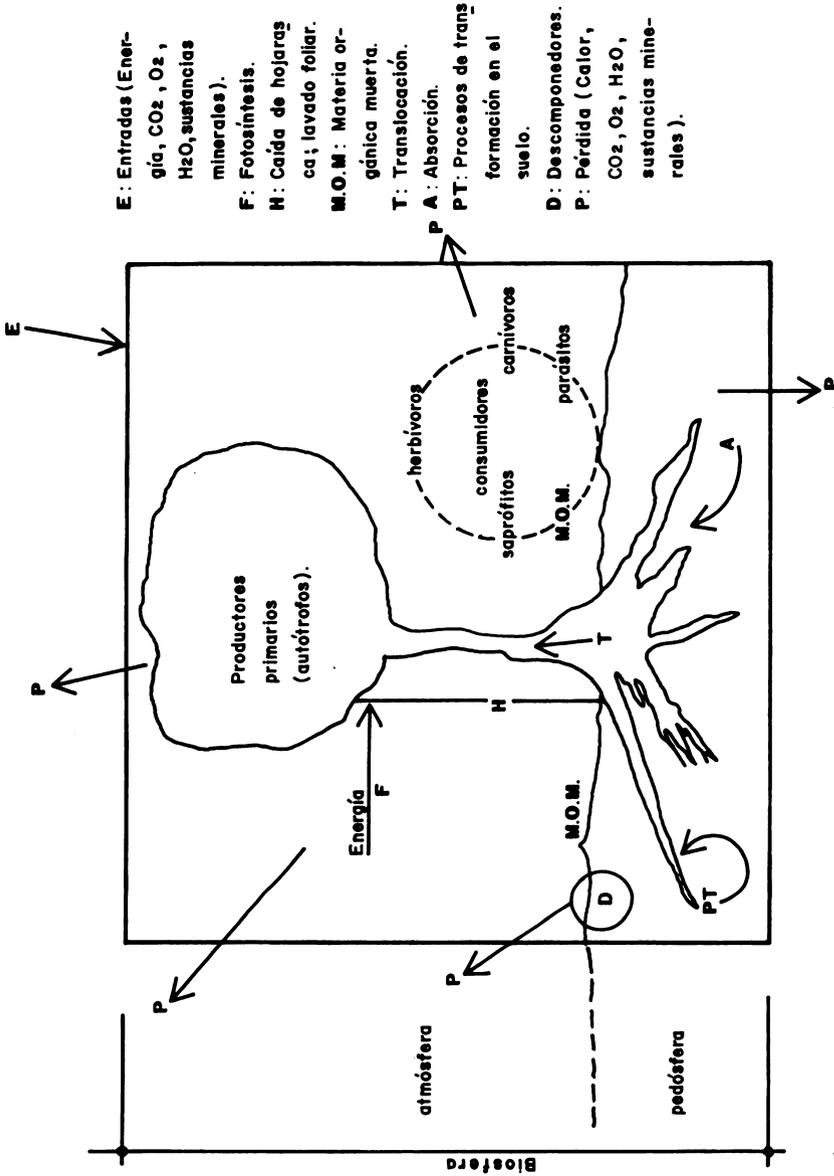


FIG. 10. El ecosistema forestal y sus componentes (adaptado por Ulrich⁹).

Los componentes del ecosistema son de dos tipos: bióticos y abióticos. Ambos, sumados, generan un biosistema en el sentido concebido por Odum⁸.

Los **componentes bióticos** abarcan los organismos autótrofos (productores), capaces de aprovechar la energía solar para su funcionamiento metabólico; los más importantes —como se mencionó— son las plantas. También son parte de los componentes bióticos los organismos heterótrofos, los cuales no pueden transformar la energía para aprovecharla en su metabolismo. Estos son de dos clases: los consumidores y los descomponedores. Los primeros pueden ser primarios o secundarios. Las cadenas tróficas estructuradas entre ellos (herbívoros, saprófitos, carnívoros, parásitos y otros) son indispensables para el metabolismo del ecosistema. Los descomponedores actúan sobre la materia orgánica, con lo que obtienen energía para su funcionamiento y la transforman en compuestos inorgánicos asimilables nuevamente por las plantas.

Los **componentes abióticos** influyen en el proceso, al modificar y/o caracterizar el ecosistema y son —como su nombre lo indica— componentes climáticos, fisiográficos, edáficos y geológicos. El clima, más que otros factores, ha influido mucho en la evolución y conformación de los ecosistemas. Así tenemos ejemplos de inundaciones, sequías, huracanes y otros fenómenos, que producen interrupciones o cambios en las comunidades de plantas y animales. Los ajustes de las especies integrantes de esas comunidades a los cambios, pueden ser muchos y muy importantes. En el caso de perturbaciones grandes, como los fenómenos de vulcanismo (frecuente en los Andes americanos), pueden originarse ambientes propicios para el desarrollo de especies nuevas. Otros cambios son inducidos frecuentemente por ventarrones, que ocasionan en las comunidades naturales forestales los llamados huecos (*gaps*), causados por la caída de árboles (Withmore¹⁰; Hartshorn⁴). Tricart (citado por Ewel²) afirma que, debido a la rapidez de la meteorización y a la preponderancia de illitas, los deslizamientos son muy comunes en las montañas tropicales.

Holdridge⁵ comenta que las condiciones promedio del conjunto de animales y plantas que caracterizan una comunidad, permanece sin cambios, mientras se lo permitan la uniformidad de los factores climáticos, edáficos y atmosféricos.

La investigación del ecosistema

Una vez conocido el concepto de ecosistema, hemos respondido a la pregunta *¿qué es?*. Para responder al interrogante *¿cómo se conoce?* debemos investigar el ecosistema.

Universalmente existen dos enfoques para investigar los ecosistemas: el enfoque sistemático individualista (p.e. ciclo de nutrimentos) y el enfoque holístico (el todo). En ambos enfoques, se deben plantear los siguientes interrogantes:

- ¿qué evaluamos o investigamos?
- ¿cómo evaluamos? (cuantitativa o cualitativamente)
- ¿cómo identificamos el cambio?
- ¿cómo medimos el cambio?
- ¿cómo comunicamos a la gente el cambio?

Sea cual fuere el método que se escoja (y éste depende de los fines del investigador), es necesario adoptar un modelo. Un listado de las plantas y animales que contiene un ecosistema, suministra un marco de referencia del tipo de sistema. Un ecosistema forestal, por ejemplo, puede obedecer a una estructura como la siguiente: estrato arbóreo (con individuos dominantes, codominantes y dominados), sotobosque, vegetación herbácea, capa de humus, suelo mineral. Una vez definida la estructura, se adopta un modelo de investigación. El más conocido es el que analiza entradas, procesos y salidas. Estos modelos generalmente son predictivos y pertenecen al campo de la Ecología sistemática.

Entradas: Son los aportes que condicionan el funcionamiento de un sistema. En sistemas naturales, pueden ser: CO_2 , O_2 , energía, agua, sustancias minerales. Pueden constituir entradas, para el caso del subsistema **suelo**: el riego, los materiales de la roca madre, los fertilizantes y los tejidos de plantas y animales (Burgos, en Hart ³).

Salidas: son los remanentes, productos o partes del sistema que salen de él, por ejemplo: energía, CO_2 , O_2 , agua, sustancias minerales.

Interacciones: las interacciones entre los componentes de un sistema son las que caracterizan su estructura. Así, para el caso de un bosque, las copas, tallos, el mantillo y el suelo mineral, se relacionan por medio de procesos de transferencia. La Fig. 11 es una representación simplificada del ecosistema forestal.

Cambios: los cambios en los ecosistemas pueden simularse por medio de modelos matemáticos, los cuales parten de las siguientes consideraciones: 1) determinación de las unidades del sistema (Kcal, Kg y otros); 2) descripción del proceso; 3) identificación de un diagrama estructural (como en la Fig. 11); 4) cálculo del balance del ecosistema (descripción matemática); 5) clasificación del modelo; 6) elección de parámetros a simular; 7) simulación.

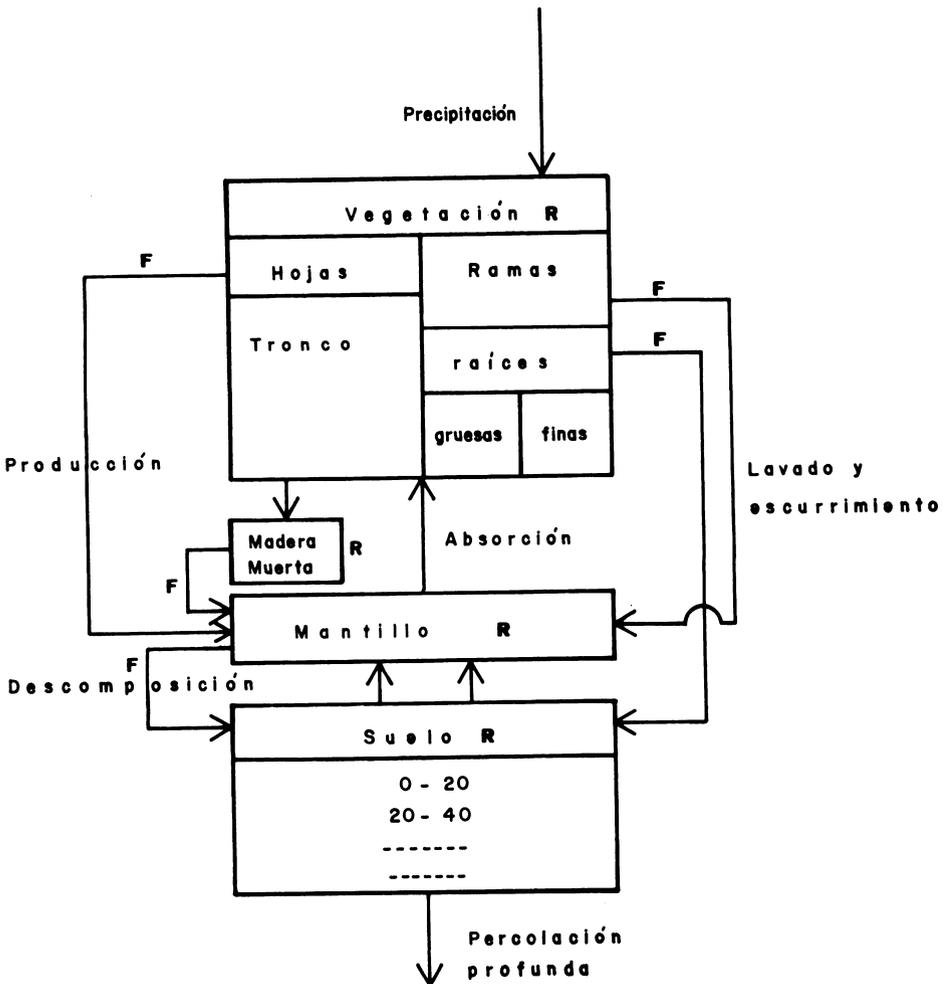


FIG. 11. Esquema simplificado de la estructura de un ecosistema forestal con compartimentos, reservas (R) y flujos (F).

Los ecosistemas pueden cambiar bruscamente cuando existe un factor de tensión o disturbio. Un **tensor** es cualquier factor o situación que fuerza a un sistema a movilizar sus recursos y a gastar más energía para mantener su homeóstasis (Seyle, citado por Lugo *et al*⁶). Ejemplos de factores de tensión son el agua, los nutrimentos, la energía, las epidemias, las sustancias tóxicas, la temperatura, el fuego, entre otros. Lugo⁷ investigó las relaciones entre los agentes de tensión y el ecosistema y sugirió que, en condiciones iguales, la respuesta del ecosistema al tensor depende del punto donde ataca éste a aquél. Si interfiere con fuentes primarias de energía y/o con procesos iniciales de transformación energética del sistema, la recuperación es lenta. Estos son los disturbios ocasionados directamente a la fotosíntesis (luz solar, agua, nutrimentos).

BIBLIOGRAFIA

1. COUSENS, J. 1974. An introduction to woodland ecology. Oliver & Boyd. 151 p.
2. EWEL, J.J. 1983. Succession. In Golley, F.B. (ed.). Tropical rain forest ecosystems; structure and function. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. The Netherlands, p. 217-223.
3. HART, R.R. 1979. Agroecosistemas; conceptos básicos. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 211 p.
4. HARTSHORN, G.S. 1978. Tree falls and tropical forest dynamics. In Tomlinson, P.B. and Zimmermann, M.H. (eds.). Tropical trees as living systems. Cambridge University Press. Cambridge, p. 617-638.
5. HOLDRIDGE, L.R. 1978. Ecología basada en zonas de vida. Traducido por Humberto Jiménez Saa. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Serie Libros y Materiales Educativos No. 34. San José, Costa Rica. 216 p.
6. LUGO, A.E.; CINTRON, G.; GOENAGA, C. 1978. El ecosistema del manglar bajo tensión. In UNESCO. Estudio científico e impacto humano en el ecosistema de manglares. Memorias de Seminario Internacional (Cali, Colombia). UNESCO. Montevideo, p. 261-285.
7. LUGO, A.E. 1978. Stress and ecosystems. In Energy and environmental stress in aquatic ecosystems. USE Symposium Series.

8. ODUM, E.P. 1965. *Ecología, estructura y función de la naturaleza*. México. CECSA, 201 p.
9. ULRICH, B. 1977. *Stoffhaushalt von waldoe kosystemen; eine arbeitsanleitung*. Vorlesungsmanuskript. Universität Göttingen. Institut fur Bodenkunde u. waldernahrung. 361 p.
10. WITHMORE, T.C. 1978. Gaps in forest canopy. In Tomlinson, P.B. and Zimmermann, M.H. (eds.). *Tropical Trees as Living Systems*. Cambridge University Press. Cambridge. p. 639-655.

DESCRIPCION ESTATICA DEL ECOSISTEMA FORESTAL

INVENTARIO DEL ECOSISTEMA

Para caracterizar cuantitativamente el bosque, es necesario realizar un inventario detallado de sus componentes. Este inventario abarca, por lo menos, las siguientes condiciones y determinaciones: composición florística, estructura vertical, distribución diamétrica, densidad, abundancia y frecuencia de las especies botánicas más importantes. La determinación de estos parámetros es materia propia de los libros y publicaciones especializadas en inventario forestal. Aquí nos referiremos a la cuantificación de los parámetros más utilizados en las ciencias biológicas.

Biomasa

La biomasa puede definirse como la producción de materia seca por unidad de superficie (g/cm^2 , kg/m^2 , ton/ha), mientras que la productividad se refiere a la biomasa por unidad de tiempo —por ejemplo, $\text{g/cm}^2/\text{hr}$, o ton/ha/año — (Odum ¹⁹, 1975). El interés por las mediciones de biomasa cobró inusitada fuerza a raíz de la crisis del petróleo en los

países tropicales. Esta crisis dio lugar a proyectos para la utilización de la madera como una fuente renovable de energía. La literatura existente sobre biomasa —de interés para biólogos, agrónomos y forestales, por su aplicación en la evaluación de la productividad— es abrumadora. Recientemente, Pardé²² hizo una revisión bibliográfica sobre biomasa forestal y estimó que en 1979 existían más de 1000 títulos sobre este tópico. Una revisión más reciente (Russo²³), se refiere a los componentes de la biomasa arbórea, tanto en su forma estática como dinámica, y a los métodos de medición. Este autor comenta que, dentro de las publicaciones dirigidas a los ecólogos, con énfasis en ciclos de nutrimentos y productividad primaria, algunas se refieren a la estimación de la biomasa arbórea. Entre ellas, destaca: Alder¹; Brown³; Heller¹⁰. En lo que respecta al trópico, son abundantes los trabajos sobre este tema. Merecen citarse: Crow⁵, Kira¹³, Kira y Ogawa¹⁶, Kira *et al*¹⁴, Kira y Shiede¹⁵.

Biomasa aérea

Existen dos métodos universalmente aceptados para estimar la biomasa aérea: la medición directa y el muestreo. El primero supone "cosechar" toda la vegetación existente, en un área suficientemente representativa, lo cual es en la mayoría de los casos impracticable, costoso y no siempre más exacto que el método de muestreo. Este consiste en relacionar el peso de un árbol con el tamaño de sus componentes (tronco, ramas, diámetro, altura), para lo cual son válidas las siguientes ecuaciones (Madgwick¹⁷, citado por Russo²³; Ogawa *et al*²⁰):

$$(1) \quad \log P = a_1 \cdot \log T + b_1$$

Donde: P: es el peso del árbol

T: es tamaño y puede ser D.A.P. o $D^2 \cdot h$ (diámetro al cuadrado por altura).

a_1 y b_1 : son constantes

$$(2) \quad P = a_2 \cdot T + b_2$$

Donde: P: es el peso del árbol
 T: es tamaño y puede ser AB (área basimétrica) o $D^2 \cdot h$
 a_2 y b_2 : son constantes

Derivadas de estas ecuaciones existen otras más complejas, tales como la de Meyer, tomada de Madgwick¹⁷ (citado por Russo²³).

$$(3) \quad P = e^{\bar{w}} + \frac{1}{2} s^2$$

Donde: P: es el peso del árbol
 e: es la base de los logaritmos neperianos
 ($e = 2,7182\dots$)
 \bar{w} : es el peso medio estimado de la regresión
 s^2 : es la varianza de la muestra

Tales estimaciones son conocidas como "regresiones logarítmicas" y su uso parecería superar las objeciones que ponen algunos autores, quienes argumentan falta de precisión (Madgwick¹⁷, citado por Russo²³).

Ogawa y colaboradores²⁰ desarrollaron una ecuación para estimar el peso de las hojas, relacionándolo con el peso del tronco, a saber:

$$\frac{1}{WL} = \frac{A}{WT} + B$$

En la cual: WL = peso de las hojas
 WT = peso del tronco
 A y B = constantes

La cosecha de los árboles seleccionados para aplicar las ecuaciones anteriores exige un trabajo dispendioso en el campo, ya que supone: tumar, cortar y cosechar las diferentes partes de los árboles-muestra; pesar sus componentes; tomar muestras de madera para determi-

nación de densidad aparente; tomar muestras representativas y pesarlas frescas, luego secarlas y volver a pesarlas; calcular contenidos de humedad; sumar los pesos secos de cada componente; relacionarlos con una superficie previamente establecida en el momento del muestreo (p. e. 1/10 de hectárea), por medio de las ecuaciones descritas; llevar el resultado a unidades de área (m^2 , ha) para comparar con otros estudios.

El tamaño de la muestra y el número de árboles a cosechar, depende en gran medida de:

- la precisión deseada;
- la variación inherente a la población-problema;
- el dinero disponible;
- la experiencia del investigador.

En los estudios sobre evaluación de biomasa, se ha trabajado con muestras muy pequeñas (10 árboles) hasta otras que alcanzan centenares (Ogawa *et al*²⁰; Kira¹³; Kira *et al*¹⁴; Madgwick¹⁷, citado por Russo²³).

La biomasa de plantaciones forestales es menos difícil de estimar. Generalmente se han utilizado tres métodos:

- a) **método del árbol-promedio**, en el cual se cosechan árboles representativos, se calcula su biomasa (tronco, ramas, hojas, frutos y otros) y el valor promedio se multiplica por el número de individuos del rodal;
- b) **método del área-muestra**, en el cual se cosecha toda la biomasa de un sitio representativo del rodal. La biomasa total se calcula utilizando el factor $\text{área rodal} / \text{área cosechada}$;
- c) **método de las funciones alométricas**, en el cual se cosechan árboles representativos y sus componentes se relacionan entre sí por medio de regresiones o ecuaciones alométricas, como se ilustró anteriormente. También este método combina las ecuaciones con el peso directo (cuando se facilita) de árboles seleccionados por su área basal (generalmente se toma toda la gama de clases diamétricas).

El peso de los árboles de una clase de área basal, se multiplica por el número de individuos pertenecientes a esa clase en todo el rodal.

Biomasa radical

La determinación de la biomasa de las raíces es una labor dispendiosa. Bohm³, citado por Russo²³, presenta una descripción detallada de los principales métodos para el estudio de raíces en general. Klinge y Forster⁶, entre otros, hicieron estimaciones de biomasa radical en bosques tropicales, advirtiendo las tremendas dificultades del trabajo de campo. Otro estudio de descripción de los métodos para estudio de raíces es el de Schuurman y Goedewaagen, aplicado a la agricultura.

Los métodos mencionados por los autores referidos cubren las siguientes variaciones:

a) excavación; b) extracción de un bloque de suelo con raíces incluidas; c) tablero con púas; d) barrenos; e) calicatas; f) isótopos.

La proporción de la biomasa radical en la biomasa aérea varía según el tipo de bosque, los tratamientos silviculturales, la edad e incluso el tipo de suelo. Estudios en el trópico húmedo africano (Greenland y Kowal⁸), asiático (Ogawa *et al*²⁰, Hozumi *et al*¹¹), y americano (Klinge, Jordan y Escalante¹², Ovington y Olson²¹, Grimm y Fassbender⁹, De las Salas, de la Torre y Acosta: datos no publicados) arrojaron resultados que oscilaron entre 10 y 32%. Estimaciones realizadas por Golley y colaboradores⁷ en el bosque húmedo tropical de Darién, Panamá, se salen del rango anterior. Ellos obtuvieron sólo un 5% (12.6 ton/ha) de biomasa radicular con respecto a la biomasa aérea.

Algunos resultados

La Fig. 12 resume las reservas orgánicas de algunos ecosistemas forestales tropicales. Se puede apreciar aquí la gran diferencia entre los bosques montanos y tropicales: estos últimos presentan mayores valores de fitomasa, pero menores reservas orgánicas en el suelo. Esto puede atribuirse a una mayor velocidad de descomposición de la materia orgánica y a un reciclaje mucho más activo.

Bioelementos

En el inventario del ecosistema es necesario estimar los bioelementos o reservas inorgánicas contenidas en la vegetación y en el suelo, con el objeto de: a) identificar su fragilidad (*status* nutricional) y

CUADRO 13: Fitomasa de diferentes sistemas agroforestales en América Tropical (Cuadro comparativo).

Autor	Lugar de estudio	Tipo de sistema	Plantas por ha	Edad (años)	Biomasa seca total del cultivo (kg/ha)		Biomasa seca del cultivo (kg/ha)		Biomasa seca total de la sombra (kg/ha)		Biomasa seca de la sombra (kg/ha)	
					Hojas	Tallos	Hojas	Tallos	Hojas	Ramas	Hojas	Ramas
Aranguren Escalante y Herrera (1982) (2)	40 km Oeste de Caracas, Venez. 1300 mts s.n.m.	Café + <i>Inga</i> sp. + <i>Erythrina</i> sp. + otros árboles de sombra.	5597	1931	?	40542.1	4086.1	29268.3	7188.7	---	---	---
(3)	Ocumare de la costa al Norte de Venezuela, 12 mts. s.n.m.	Cacao + <i>Erythrina</i> sp + <i>Castilla elástica</i> + <i>Artocarpus</i> elást. + otros	947	566	30	17104.3	2548	9879.1	4677.2	---	---	---
Golberg y Jiménez Avila (15)	Topolco, Veracruz México	Café + <i>Inga jinicuil</i> <i>musa</i> sp.	3600	50	45	66	16713	2313	7560	6840	27940	430
Russo 1983	CATIE, Turrialba Costa Rica, 602 m.s.n.m.	Café + <i>Erythrina</i> <i>poeppligiana</i>	4300	280	2	8	---	---	---	---	---	---
Estudio de "La Montaña" Alpizar 1961-1982	CATIE, Turrialba Costa Rica, 602 m.s.n.m.	Café + <i>Erythrina</i> <i>poeppligiana</i> Café + <i>Cordia alliodora</i> Cacao + <i>Erythrina</i> <i>poeppligiana</i> 3 Cacao + <i>Cordia alliodora</i>	5000 5000 1111 1111	555 185	5 5	5 5	15295 7849	2698 1886	3817 2194	8780 5769	20169 29229	4684 2269
"	"	"	1111	278	5	5	8362	2827	3030	2505	21905	3273
"	"	"	1111	278	5	5	9819	2972	4043	2804	31887	3410
"	"	"	494	5	5	5	---	---	---	---	23108	4196
Beer (1982) (5)	La Suiza, Turrialba Costa Rica, 610 m.s.n.m.	Café + <i>Erythrina</i> <i>poeppligiana</i>	3922	463	5	5	---	---	---	---	44824	5608
(5)	La Suiza, Turrialba Costa Rica, 610 m.s.n.m.	Café + <i>Erythrina</i> <i>poeppligiana</i> + <i>Cordia alliodora</i>	3509	222	14	0-17	---	---	---	---	7785	3793
		poró + 475 de laurel										2959
												1656
												1302

(1) Se toma en cuenta el cultivo y la *Inga jinicuil*
 (2) Datos se refieren a la determinación por concepto de una podas del árbol poró.
 FUENTE: Alpizar¹; Fasbender y Heuvelink².

- Los datos se refieren a la suma de dos podas del árbol de poró en un año.
- Los datos se refieren a la suma de 3 podas del árbol de poró en un año.
- Los datos se refieren exclusivamente a la suma de 3 podas del árbol de poró en un año; el laurel no se tomó en cuenta.

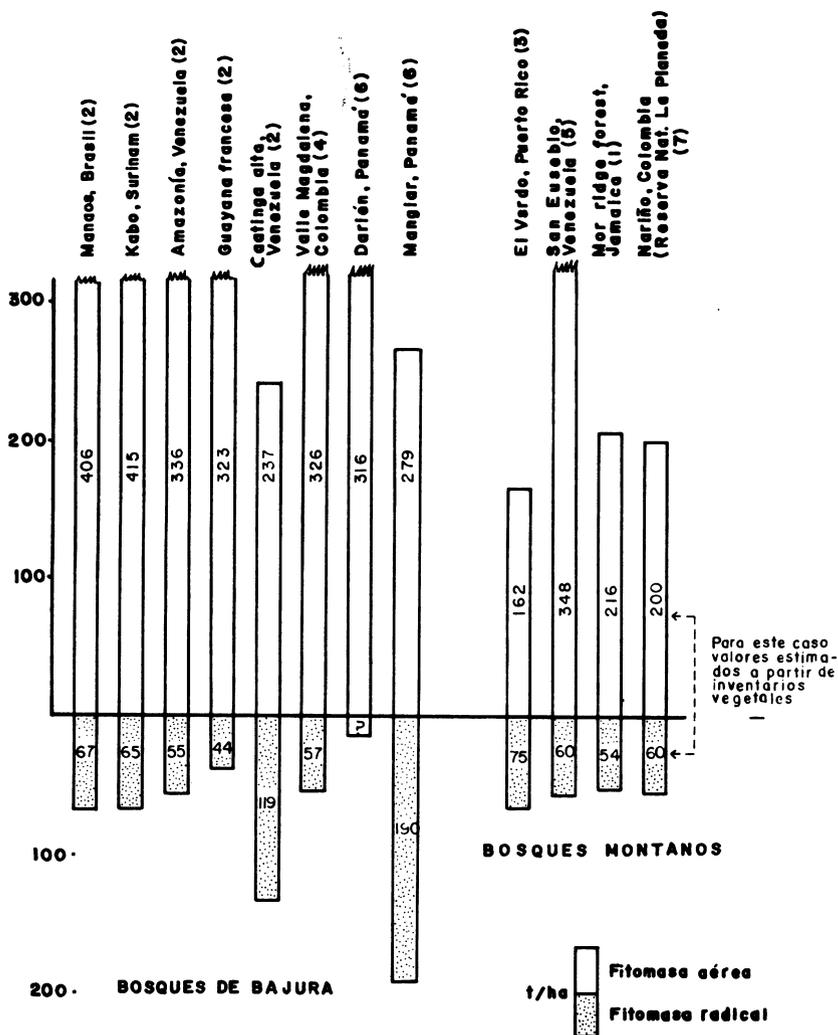


FIG. 12. Reservas orgánicas de algunos ecosistemas boscosos de América Tropical.

FUENTE: 1. Grubb. 1977. Ann Rev. Ecol. Syst; 2. Klinge; Herrera. 1983. Vegetatio. 53; 3. Odum; Pigeon. 1970; 4. Salas, G. de las. 1973. Göttingen. Bodn Kl. Ber. 27; 5. Grimm; Fassbender 1981; 6. Golley *et al.* 1969. Bioscience 19(8); 7. Salas, G. de las; Ballesteros, datos no publicados.

CUADRO 14: Reservas minerales de algunos ecosistemas forestales tropicales (Kg/ha).

Ecosistemas	Fitosoma Viva					Raíces					Mantillo					Suelo Mineral				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
Blue Forest Jamaica ¹	432	26	259	432	160											2000	-	29	7	89(45)
El Verde, Pto. Rico ²	1021	59	926	1129	253	27	6	21	29	8	-	12	2	46	10	4600	220	34	450	310(30)
San Eusebio Venezuela ³	875	52	1322	736	215	232	14	147	154	39	583	29	59	216	55	3223	509	180	204	52(40)
La Planada Nariño, Col. ⁴						420	40	150	200	40						4300	0	760	1000	720(35)
Magdalena, Col. ⁵	741	27	277	432	133						672	18	32	94	28	5340	254	119	31	43(50)
Turrialba, Costa Rica ⁶	246	45	455	390	84	53	1.3	15	41	9.5										
San Carlos Venezuela ⁷	336	32	321	339	53	834	69	327	244	142	52	3	6	33	16	785	36	69	234	14(40)
Manaos, Brasil ⁸	2428	59	434	424	202	561	7	62	83	55	77	1	3	20	8	1421	124	18	0	6(30)

FUENTE:

- 1 Tanner, 1977
- 2 Golley *et al.*, 1975
- 3 Grimm; Faabender, 1981
- 4 Salas de las Ballestas (datos no publicados)
- 5 Foelster, de las Salas, Khanna, 1976
- 6 Ewel *et al.*, 1981
- 7 Herrera, 1979 (en Golley, 1983)
- 8 Klinge, 1977

controlar sus entradas y salidas (monitoreo), según los objetivos del manejo; b) comparar sus reservas con las de otros ecosistemas. El *status* nutricional del suelo bajo bosque natural se discute brevemente en el Cap. 13. Aquí nos limitaremos a aportar información que creemos útil para el inventario de ecosistemas forestales tropicales. Debemos advertir que las comparaciones entre ecosistemas diferentes, serán tanto más válidas cuanto más uniformes sean los métodos de análisis químico de los elementos. En los últimos años, la introducción de técnicas como la absorción atómica, han contribuido mucho en este sentido y han garantizado una alta precisión de los datos.

La mayor parte de las reservas inorgánicas de los bosques se encuentran inmovilizadas en los tallos (hasta un 80% en algunos casos). Para tener una idea de estas reservas en algunos ecosistemas forestales tropicales, se presenta el Cuadro 14. De él se deduce que existe gran diferencia en el capital de nutrimentos, entre los diferentes ecosistemas. Este inventario es necesario al ecólogo para saber en qué medida puede cambiar el ecosistema cuando es intervenido (p.e. quemas, disturbios naturales, explotación de madera y otros). La descomposición de la materia orgánica, las tasas de mineralización, las relaciones C/P y C/N son indicadores valiosos de la dinámica del ecosistema forestal (Cap. 8). Las reservas de nutrimentos inmovilizadas en los troncos y cortezas después de la explotación, pueden ser aprovechadas por árboles reproductores, de regeneración natural, que colonizan sitios recién talados (Ewel y Conde, citados por Wadsworth²⁴).

BIBLIOGRAFIA

1. ALDER, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. V. 2. Predicción del rendimiento. FAO. Roma. Estudio de Montes No. 22. 80 p.
2. ALPIZAR, L.; FASSBENDER, H.W.; HEUVELDOP, J. 1983. Estudio de sistemas agroforestales en el experimento central del CATIE, Turrialba: I. Determinación de biomasa y acumulación de reservas nutritivas (N, P, K, Ca, Mg). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Departamento de Recursos Naturales Renovables. Turrialba, Costa Rica. 27 p. (mimeo.).
3. BOHM, W. s.f. Methods of studying root systems; analysis and synthesis. Berlin, Springer, 188 p.
4. BROWN, J.K. 1976. Estimating shrub biomass from basal stem diameters. Canadian Journal of Forest Research 6(2):153-158.
5. CROW, T.R. 1978. Common regressions to estimate tree biomass in tropical stands. Forest Science 24:110-114.
6. FORSTER, M. 1971. Beobachtungen über den wurzelsystem im tropischen regenwald, Kolumbiens. Forstarchiv. También en: Plant research and development, 1979. 10:39-45.
7. GOLLEY, F.B. *et al.* 1971. La biomasa y la estructura mineral de algunos bosques de Darién, Panamá. Turrialba 21(2):189-196.
8. GREENLAND, D.J.; KOWAL, J.M.L. 1960. Nutrient content of moist tropical forest of Ghana. Plant and Soil. 12:154-174.

9. 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 31(1):27-36.
10. HELLER, H. 1971. Estimation of biomass of forest. In Ellenberg, H.E. Integrated experimental ecology. Berlín. Springer, p. 45-47.
11. HOZUMI, K. *et al.* 1969. Producción ecology of tropical rain forests in southwestern Cambodia I: plant biomass. Nature & Life in SE-Asia. VI: 1:51.
12. JORDAN, C.; ESCALANTE, G. 1980. Root productivity in an Amazonian rain forest. Ecology 61(1):14-18.
13. KIRA, T. 1978. Community architecture and organic matter dynamics in tropical lowland rain forests of Southeast Asia with special reference to Pasoh Forest, West Malasia. In UNESCO/CIFCA. Ecosistemas de los bosques tropicales; informe sobre el estado de los conocimientos, p. 561-590.
14. KIRA, T. *et al.* 1967. Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand IV: dry matter production with special reference to the Khao Chong rain forest. Nature & Life in Se-Asia. V. 5. p. 150-174.
15. _____; SHIDEI, T. 1967. Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the western Pacific. Jap. Jour. Ecol. 17(2):70-87.
16. _____; OGAWA, H. 1971. Assessment of primary production in tropical and equatorial forests. In Duvigneaud, P. (ed.). Productivity of forest ecosystems. Proceedings of the Brussels Symposium. París. UNESCO IPP, p. 309-321.
17. MADGWICK, H.A. 1976. Mensuration of forest biomass. In IUFRO International Congress. XVI. Proceedings. División IV. Oslo, Norway. Orono, Maine. University of Maine, College of Life Sciences and Agriculture, p. 13-27.

18. NEWBOULD, P.J. 1967. Methods for estimating the primary production of forest. Oxford, Blackwell Scientific Publications. IBP Handbook No. 2. IX. 62 p.
19. ODUM, E.P. s.f. Ecología, estructura y función de la naturaleza. México. CECSA. 201 p.
20. OGAWA, H. *et al.* 1965. Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand II: plant biomass. *Nature and Life in Se-Asia*. 4:50-80.
21. OVINGTON, J.D.; OLSON, J.S. s.f. Biomass and chemical content of El Verde lower montane rain forest plants. In Odum, H.T. (ed.). *A tropical rain forest*, Vol. 3, Section H-2. Springfield. U.S. Atomic Energy Commission. p. 53-79.
22. PARDE, J. 1980. Forest biomass. *Forestry Abstracts Review*. Commonwealth Forestry Bureau 41(8):343-361.
23. RUSSO, R.O. 1983. Mediciones de biomasa en sistemas agroforestales. Trabajo presentado en el curso corto sobre metodologías de investigación agroforestal en el trópico húmedo. UNU/CATIE/IICA-TROPICOS/CONIF. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 27 p. (mimeo).
24. WADSWORTH, H. 1982. Ecological and management considerations for forested lands. In National Research Council. *Ecological aspects of development in the humid tropics*. Washington, National Academy Press, p. 121-156.
25. WITHMORE, T.C. 1975. *The tropical rain forest of the Far East*. London. Clarendon Press.

DESCRIPCION DINAMICA DEL ECOSISTEMA

Productividad

La tasa total de asimilación de los productores en un ecosistema, se identifica como productividad primaria y equivale a la cantidad total de materia orgánica fijada, incluyendo aquélla utilizada para la respiración vegetal durante el período de medición (Odum⁶). Los forestales consideran la productividad de un bosque como la producción de madera por hectárea, expresada en kilogramos o toneladas.

La productividad primaria bruta (PPB) es el peso seco, aumentado por la fijación del carbono de la atmósfera en la fotosíntesis. Generalmente se expresa como la tasa, en la cual ésta ocurre por unidad de tiempo y área. La PPB depende no sólo del área foliar expuesta, de la cantidad de luz y de la temperatura, sino también de las características inherentes a la planta. Una gran parte de esta PPB se pierde por la respiración. El producto restante, después del proceso respiratorio, se designa como productividad primaria neta (PPN); y su acumulación a lo largo del tiempo, como producción primaria neta, vale decir, la materia orgánica almacenada en los tejidos

] 111 [

vegetales que no se utiliza para la respiración durante el período de medición.

Parte de la producción primaria neta puede ser almacenada o transformada, vía heterótrofos. Esta producción se conoce normalmente como producción secundaria. La Fig. 13 relaciona los conceptos esbozados mediante un diagrama de flujos energéticos y cadenas alimenticias.

Odum⁶ comenta que, en líneas generales, la reducción de la energía disponible en cada eslabón de la cadena alimenticia es, más o menos, de dos órdenes de magnitud en el primer nivel trófico (primario) y de un orden de magnitud en los subsiguientes. Este orden, según el mismo autor, es de una potencia decimal. Así, si una magnitud de 1500 kcal/m²/día de energía luminosa es absorbida por los vegetales, cabe esperar que la producción vegetal neta sea de 15, que 1/10 de este valor (1.5) sea reconstituído como consumidores primarios (herbívoros) y 0.3 como secundarios (carnívoros), siempre que la adaptación de los organismos al medio sea normal y puedan utilizar completamente tales recursos.

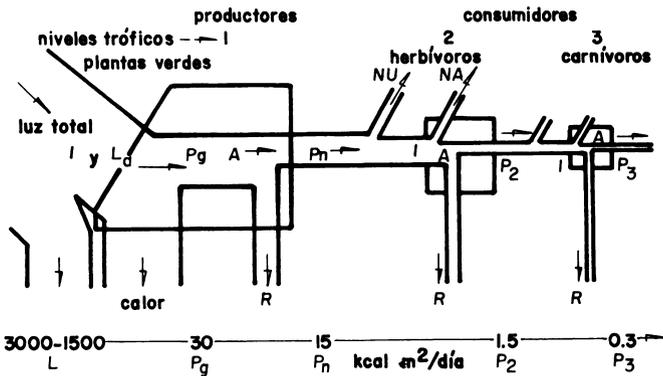


FIG. 13. Un diagrama simplificado de flujo energético en una cadena alimenticia (FUENTE: Odum⁶). Las cajas representan el contingente actual de organismos (1: productores o autótrofos; 2: consumidores primarios o herbívoros; 3: consumidores secundarios o carnívoros) y los conductos representan el flujo de energía a través de la Comunidad biótica. L = luz total; Pg = producción primaria bruta; Pn = producción primaria neta; P = producción secundaria al segundo (P2) y tercer (P3) niveles tróficos; I = entrada de energía; A = energía asimilada; NA = energía no asimilada; NU = energía sin utilizarse (almacenada o exportada); R = pérdida de energía en la respiración. La cadena de cifras a lo largo del margen inferior del diagrama indica el orden de magnitud esperada en cada transferencia sucesiva, partiendo de 3000 kcal por metro cuadrado por día, de luz incidente.

Producción y descomposición de residuos vegetales

El estudio del ciclo de los materiales vegetales (hojas, ramas, frutos, raíces, tallos, flores), constituye la parte dinámica del ecosistema forestal, e incluye las partes siguientes: a) cantidad de residuos vegetales incorporados vía hojarasca; b) composición química de los mismos; c) procesos de descomposición y mineralización de la materia orgánica; d) liberación de gases (CO_2) y bioelementos. La descomposición de los residuos vegetales y la formación de humus dependen de factores bióticos (organismos del suelo) y abióticos (clima). Este tema se tratará en detalle en el Cap. 8.

CUADRO 15: Producción de hojarasca (t/ha/año) y transferencia de elementos químicos (Kg/ha/año) con los residuos vegetales en algunos ecosistemas forestales americanos.

Ecosistema	Hojarasca	N	P	K	Ca	Mg
San Carlos, Amazonía ¹ , Ven.	7	72	4	40	17	17
San Eusebio, Venezuela ²	7	69	4	33	43	14
Magdalena, Colombia ³	12	141	4.2	141	17	12
Caparo, Venezuela ⁴	8	112	10.6	52	153	27
Río Negro, Colombia y Ven. ⁵	14	80	5	33	33	—
Darién, Panamá ⁶	11	—	12	197	298	35
El Verde, Pto. Rico ⁷	5.5	88	—	2	50	12

FUENTE:

- Herrera, 1979 (Datos tomados de Golley, F. 1983, Ecosystem of the World 14A. Elsevier Scientific Publ. Cap. 9. 137-156)
- Fassbender; Grimm, 1980
- Foelster; Salas, de las, 1976
- Franco, W. 1979
- Saldarriaga, Bosque nativo de 80 años. Comunicación personal. Información detallada en: Saldarriaga, J.G. Forest Succession in the Upper Río Negro of Colombia and Venezuela. Ph.D dissertation. Univ. of Tennessee, Knoxville, Tennessee, EUA. (en preparación)
- Golley *et al* 1975
- Jordan *et al* 1972 (en Golley, 1983)

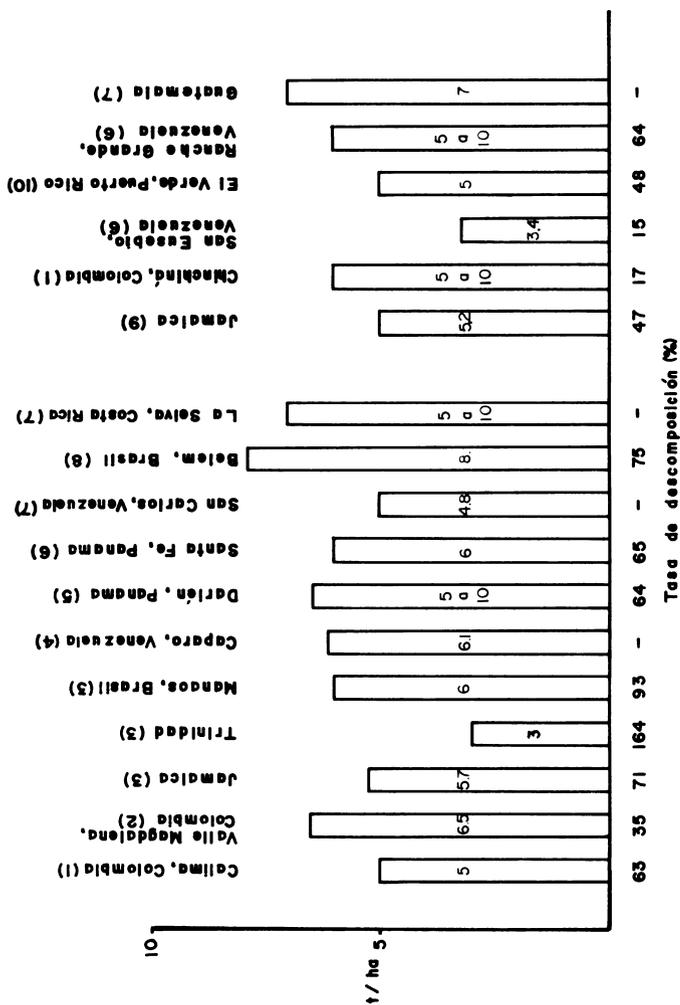


Fig. 14. Producción anual de hojarasca (leaf litter) en diferentes ecosistemas forestales americanos y su tasa de descomposición.

FUENTE: (1) Jenny *et al.*, 1949; (2) Foelster y De las Salas, 1976; (3) Grubb, 1977; (4) Franco, 1979; (5) Golley *et al.*, 1975; (6) Fassbender; Grimm, 1981; (7) Proctor, 1984; (8) Klinge, 1977; (9) Tanner, 1981; (10) Odum y Pigeon, 1970.

La producción de residuos vegetales, su transferencia de materia orgánica y elementos químicos en diferentes ecosistemas forestales, montanos y de llanura, se resumen en el Cuadro No. 15 y en la Fig. 14 (ver también datos complementarios en el Cuadro 18).

Los datos arrojados por los diferentes ecosistemas, tanto en el cuadro como en la figura, difieren bastante, como corresponde a climas, suelos y especies diferentes. A pesar de ello, la importancia de estos datos resulta de una inmensa utilidad para:

1. **estudios de sucesión vegetal** (tasas de renovación de la masa foliar; *status* nutricional del bosque; caracterización bioquímica de la vegetación y la materia orgánica; crecimiento anual de biomasa; análisis de catabolismo y anabolismo);
2. **estudio de impacto ambiental en la construcción de represas** (biomasa inundable, cantidad de elementos químicos contenidos en la biomasa y en el mantillo que "fertilizarán" el agua del embalse, tasas de descomposición de la materia orgánica);
3. **proyectos de manejo de bosques y reservas naturales** (caracterización de ecosistemas, inmovilización de nutrimentos en la vegetación y explotación de los mismos con el aprovechamiento del bosque, fragilidad de ecosistemas).

El índice de transformación de materia orgánica da una idea al investigador de las características del proceso de descomposición y humificación de los residuos vegetales. La Fig. 14 trae adicionalmente estos índices para los ecosistemas comparados. Estas tasas de transformación van desde 15^o/o (ecosistema montado de Venezuela) hasta 164^o/o (bosque de bajura, Trinidad). Una discusión sobre la descomposición de humus en ecosistemas boscosos tropicales y de sabana, se presenta con cierto detalle en el Cap. 8. En general, podemos decir que los bosques tropicales húmedos aportan al suelo unas cinco veces más residuos frescos vía hojarasca, que los bosques de zonas templadas. En los pastizales, esta materia orgánica fresca se adiciona principalmente por la descomposición de raíces. Los estudios sobre tasas de renovación total de raíces en los bosques tropicales, son escasos. Jordan y Escalante⁴, en sus trabajos sobre la Amazonía venezolana, calcularon una tasa de acumulación de raíces superficia-

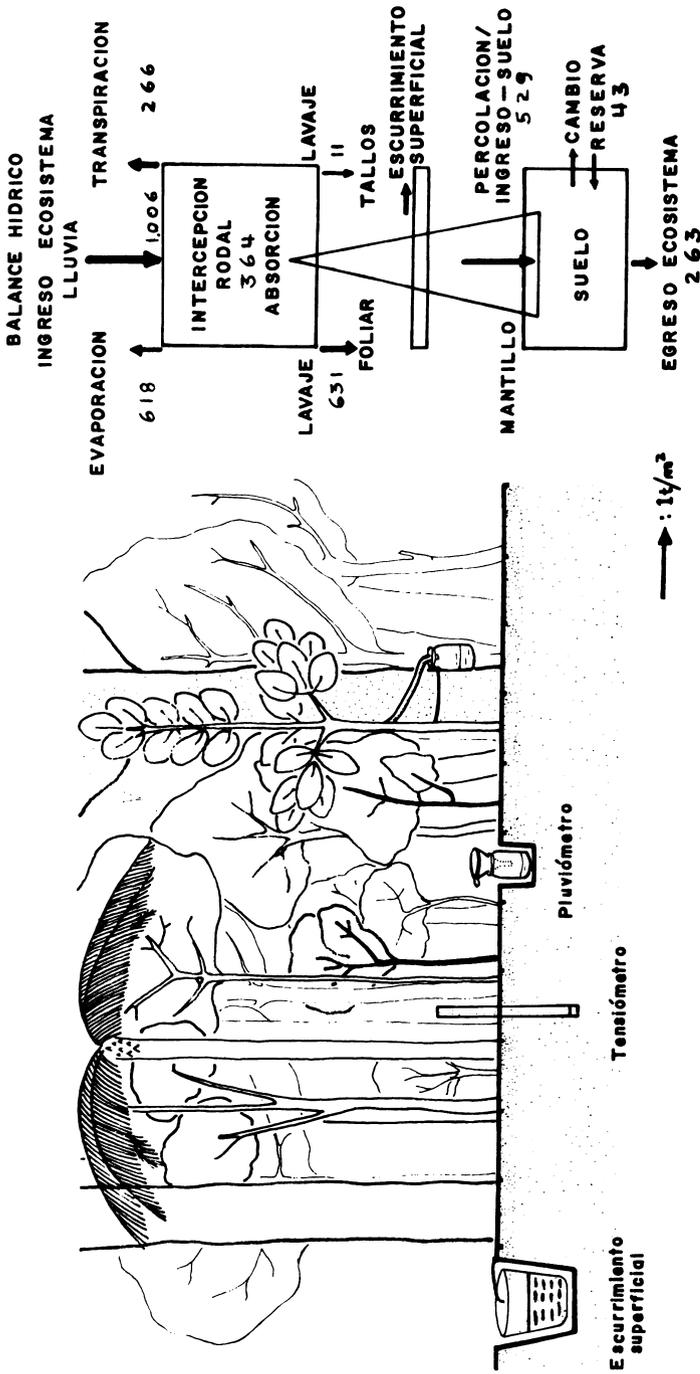


FIG. 15. Representación estructural de un bosque nativo altoandino, con indicación de los flujos de agua (Ballesteros, M.; Salas, G. De las; Cardoso, H. Introducción al balance hídrico en tres comunidades forestales: Sabaneta, Cundinamarca, Colombia. (Datos no publicados).

les de $117 \text{ g/m}^2/\text{año}$ y un incremento total de biomasa radical de $200 \text{ g/m}^2/\text{año}$. La tasa de renovación total de raíces fue estimada en 28 años, dividiendo la biomasa radical (5600 g/m^2) entre su incremento ($200 \text{ g/m}^2/\text{año}$). Estos autores concluyeron que existe una alta eficiencia del tapiz radical en atrapar nutrimentos, debido a que hay una alta proporción de raíces finas. Por su parte, Kira⁵, al referirse a los bosques del Sudeste de Asia, calculó un tiempo de desaparición total de 1.2 años para el mantillo fino y de 15.8 años para el mantillo grueso (madera y ramas gruesas). Grubb³ indica que la producción de mantillo, particularmente de hojas, declina mucho menos que la producción de componentes maderables y estima entre 14 y 18 meses la vida de las hojas en bosques montanos de Jamaica. A una cifra similar (20 meses), llegaron Fassbender y Grimm¹ para un bosque montano de *Podocarpus rospigiosii* en Venezuela.

La tasa de descomposición de los residuos orgánicos no depende simplemente de los factores ambientales, como la temperatura, sino en mucho mayor grado de las especies. Un fenómeno que influye en la tasa de descomposición es la altitud, que se halla en función inversa de ésta; tal hecho se evidencia en las tasas de mineralización de humus en el suelo (ver Cap. 8).

Translocación de bioelementos

Los bioelementos ingresan al ecosistema con el agua, que los transporta entre los diferentes compartimientos. Uno de los ciclos más importantes de la naturaleza es el hidrológico. De él nos ocuparemos en el Cap. 14. Para identificar y estimar la translocación de los elementos químicos en forma experimental, es menester describir todos los procesos de transferencia del agua. La Fig. 15 es una representación esquemática de las mediciones de flujos de agua en el ecosistema.

La información sobre la translocación de elementos químicos con la lluvia, en los ecosistemas forestales tropicales, es escasa todavía.

En estudios de esta índole, se miden los flujos hidrológicos (lluvia afuera y adentro del bosque, interceptación, lavado foliar y de tallos, escurrimiento superficial y contenido de agua en el suelo y su cambio durante un año) y la concentración de los elementos químicos transportados (mg/litro) con base en el análisis químico de mues—

tras representativas de agua. La cantidad de lluvia caída y percolada (lavado foliar) se registra en pluviómetros o pluviógrafos; el lavado por los tallos se estima colocando collarines de caucho alrededor de éstos y en un número de árboles representativo de la muestra estudiada. El escurrimiento superficial se registra en canaletas o recipientes de volumen conocido, distribuidos convenientemente en el área de estudio. El contenido de agua en el suelo se determina en función de tensiómetros colocados a diferentes profundidades. Para la recolección de muestras de agua, se colocan placas lisimétricas de cerámica a las mismas profundidades que las escogidas para los tensiómetros. Las muestras de agua de percolación deberán representar las condiciones hidrológicas del suelo a esa profundidad.

Las concentraciones de los diferentes elementos químicos analizados en las muestras de agua, permiten calcular los valores promedio mensuales. Estos valores se multiplican por la cantidad de agua registrada en cada uno de los flujos (mm o litros/m²), con el objeto de obtener las tasas de transferencia buscadas.

La concentración de los elementos químicos en los diferentes compartimientos del ecosistema, se ilustra en la Fig.16 para el caso de San Eusebio. Se observa un cambio en las concentraciones al pasar de un compartimiento a otro: aumentan con el escurrimiento foliar, alcanzan su valor máximo en el mantillo y disminuyen al llegar al suelo mineral.

La transferencia de elementos químicos dentro del ecosistema, se resume en el Cuadro 16, tomando como ejemplo el bosque de Caatinga de la Amazonía venezolana. La utilidad de los datos consignados en este cuadro depende de los fines del investigador, pero aquí también es válido lo dicho con respecto a la utilidad de la información del Cuadro 15 y de la Fig. 14.

El presente capítulo es apenas una breve síntesis de la dinámica de los ecosistemas (forestales en este caso) y un estímulo al estudio de estos temas, a quien remitimos a literatura especializada.

CUADRO 16. Tasas de transferencia de nutrimentos dentro de los compartimientos del ecosistema forestal amazónico de Caatinga, Venezuela (Kg/ha/año).

Flujos	N	P	K	Ca	Mg
Lluvia	21.2	16.7	18.0	16.0	3.1
Escurrecimiento foliar	25.2	5.5	29.5	6.0	4.1
Aporte de hojarasca fina	42.1	2.6	27.3	31.0	8.8
Renovación radical	225.0	17.1	89.1	50.4	37.3
Absorción por la vegetación	273.2	8.8	129.5	73.0	47.4
Lavado a 12 cms	15.3	21.2	26.0	21.2	4.4

FUENTE: Herrera, R.A. 1979. Nutrient distribution and Cycling in an Amazon Caatinga Forest on Spodosols in Southern Venezuela. PhD Dissertation. Univ. of reading. (Original no consultado; datos tomados de Golley, F. 1983. Ver referencia bibliográfica).

BIBLIOGRAFIA

1. FASSBENDER, H.W.; GRIMM, U. 1980. Ciclos bioquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela. II: Producción y descomposición de residuos vegetales. Turrialba 31(1): 39-47.
2. 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 31(2): 89-99.
3. GRUBB, P.J. 1977. Control of forest growth and distribution on wet tropical mountains; with special reference to mineral nutrition. *Annual Review of Ecology and Systematics* 8: 83-107.
4. JORDAN, C.F.; ESCALANTE, G. 1980. Root productivity in an Amazonian Rain Forest. *Ecology* 61(1): 14- 18.
5. KIRA, T. 1978. Community architecture and organic matter dynamics in tropical lowland rain forests of Southeast Asia with special reference to Pasoh Forest, West Malaysia. *In* UNESCO/CIFCA. Ecosistemas de los bosques tropicales; informe sobre el estado de los conocimientos (Traducción de la versión en inglés: Tropical Forest Ecosystems. UNESCO/UNEP/FAO). 561 p.
6. ODUM, E.P. 1980. Ecología: el vínculo entre las ciencias naturales y las sociales. México. Compañía Editorial Continental, S.A. 395 p.
7. ULRICH, B. 1977. Stoffhaushalt von Waldoekosystemen; eine Arbeitsanleitung. Univ. Göttingen. Institut für Bodenkunde und Waldernachrong. Göttingen. 361 p.

LA MATERIA ORGANICA DEL SUELO

Formación y función de la materia orgánica del suelo

La materia orgánica es producida en gran parte por las plantas y los microorganismos del suelo, a través de la fotosíntesis y otros procesos, y se compone en gran medida de muchos compuestos de carbono. Los componentes más comunes son polisacáridos, inclusive celulosa, hemi-celulosa, ligninas, sustancias pépticas y otros. Las ligninas son relativamente resistentes al ataque bacteriano y, por consiguiente, tienden a acumularse en los procesos de descomposición. Sin embargo, tampoco permanecen totalmente inalteradas. Los cambios que se producen en el proceso de descomposición de la materia orgánica tienen como resultado habilitarla para retener cationes y aniones, los cuales forman el mayor grupo de nutrimentos de la planta (Allison²; Kononova¹⁴; Williams y Joseph³¹).

Las materias orgánicas del suelo y de la planta contienen también proteínas y otros componentes nitrogenados. El nitrógeno se acumula en la materia orgánica del suelo, debido a que es un compo-

nente importante en las células microbianas y un elemento que se recicla muchas veces con el rejuvenecimiento de células. Además, las partículas de arcilla ejercen una acción protectora sobre la proteína y otras moléculas, atrapándolas dentro de sus micelas. Las sustancias orgánicas también resultan a partir de reacciones entre las proteínas y otros constituyentes de la materia orgánica del suelo, tales como la lignina. Estos complejos son igualmente resistentes a la acción microbiana.

La materia orgánica no es la misma en todos los suelos. El tipo de vegetación, la naturaleza de la población microbiológica del suelo, el tipo de drenaje, la lluvia, la temperatura y el manejo del suelo, desde el punto de vista agrícola, afectan el tipo y la cantidad de materia orgánica que se encuentre. La materia orgánica, en resumen, es el producto de su ambiente (Fassbender¹⁰, Nye y Greenland²¹ Williams y Joseph³¹).

Principales tipos de humus del suelo

Las principales formas de humus, según Müller (en Kubiena¹⁵), son las siguientes: **moder**, **mull** y **humus bruto**. Los tipos de humus que se encuentran, en mayor cantidad, en los bosques tropicales de América son el humus bruto y el moder. Un estado avanzado de materia orgánica, como la describe Müller, casi no se encuentra en los bosques del trópico. Literatura relevante sobre este tema, se puede encontrar en el libro de Lutz y Chandler¹⁹ y en Kubiena¹⁵. Al final de este capítulo, se reseñan algunos artículos y tratados que hablan específicamente sobre materia orgánica, su clasificación y su descomposición. Aquí nos referimos solamente a los tres componentes principales del humus que intervienen en la dinámica biológica del suelo. Estos componentes constituyen el horizonte L (litter). Esta capa consiste de restos inalterados que permanecen, como consecuencia de la descomposición parcial de animales y plantas. Algunos autores lo han descrito como el horizonte Aoo (Kubiena¹⁵). El horizonte F (la F de fermentación) consiste fundamentalmente de restos más alterados que el horizonte L descrito anteriormente. La estructura de los restos vegetales todavía está bien diferenciada y permite su identificación. El horizonte H es un horizonte orgánico, íntimamente ligado al horizonte mineral propiamente dicho. Aquí ya los restos orgánicos no pueden diferenciarse.

La composición del humus del suelo forestal es muy compleja. A continuación se enumeran sólo algunos de sus componentes:

- 1) un número variable de constituyentes residuales como celulosas, hemicelulosas, grasas y otros derivados de los materiales descompuestos de plantas y animales;
- 2) restos de ligninas, cutinas, taninos y resinas;
- 3) células microscópicas, sintetizadas en el proceso de descomposición de la materia orgánica que llega al suelo;
- 4) productos que alcanzan la descomposición y son sintetizados (por ejemplo, ácidos orgánicos e inorgánicos, amonio, nitratos y sales minerales).

Una descripción más detallada de los tipos de humus se encuentra al final del capítulo.

Los materiales no humínicos y las huminas

Los productos microbiales, tales como los ácidos orgánicos, pertenecen al grupo de los materiales no humínicos. En el suelo, los polisacáridos participan entre 5 y 30% de la materia orgánica, y los polirónidos entre un 2 y un 5% de ella. Del nitrógeno orgánico total, de un 5 a 10% se encuentra en forma de azúcares aminados. El significado de los materiales no humínicos del suelo, los cuales son más fácilmente descomponibles que otros, radica en el hecho de que sirven de fuente de alimento natural a los organismos heterótrofos del suelo e influyen decisivamente en la actividad biológica del suelo. La velocidad de descomposición de la materia orgánica está influida por algunos factores, principalmente la actividad microbiológica, la cual está sujeta también a la temperatura, humedad, aireación, pH y contenido de nutrimentos del suelo. Los productos de transformación de las sustancias no humínicas son: a) huminas; b) ácidos orgánicos de bajo peso molecular, tales como productos transformables de los microorganismos (aminoácidos, ácido sulfúrico, ácido oxálico y otros); c) compuestos inorgánicos como CO_2 , H_2O , nitratos y fosfatos, que tienen un significado como nutrimentos en las plantas. A través de la descomposición bajo condiciones anaeróbicas, aparecen también metano, ácido sulfhídrico y otros productos; además, se libera energía. El otro gran grupo lo forman las huminas, constituídas a partir de polímeros de alto peso molecular y compuestos orgánicos de color oscuro. Su alta resistencia microbiana conduce a un enriquecimiento de estas sustancias en el suelo. Su color es responsable de la coloración oscura, característica de los horizontes A del suelo (horizontes organo-minerales), bajo condiciones templadas; aunque en el trópico, con frecuencia, los óxidos de Fe (III) enmascaran este color.

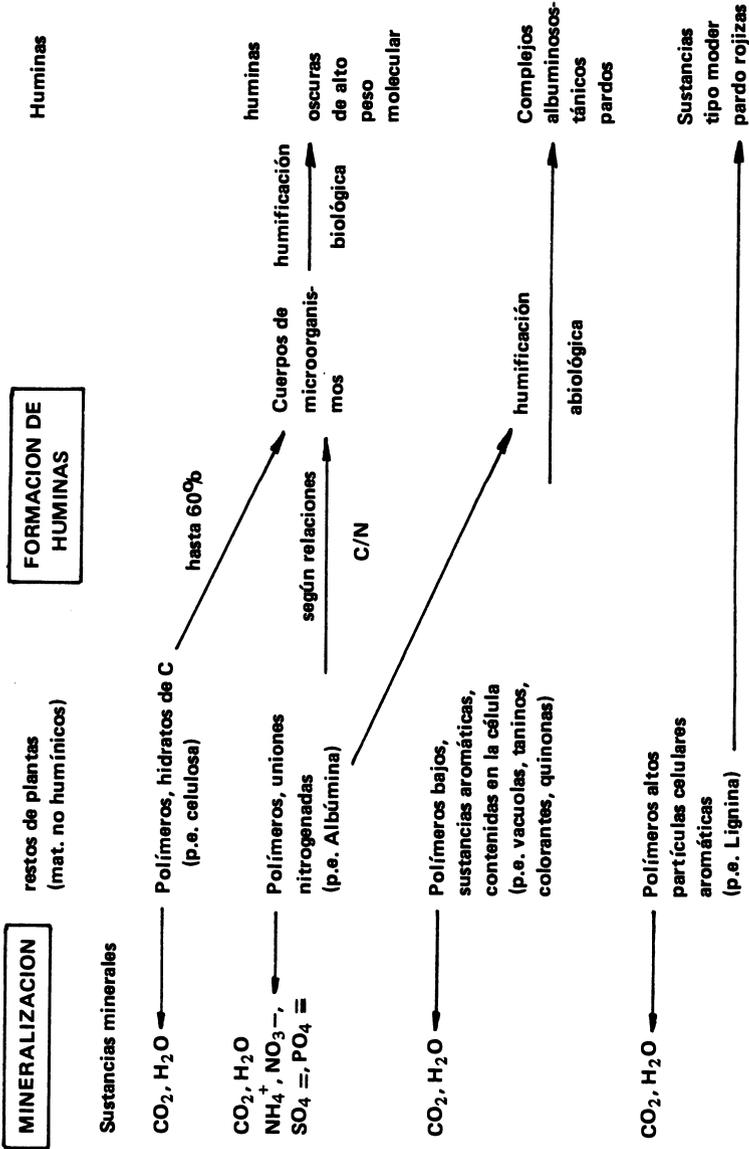


FIG. 16. Transformación de la materia orgánica.

FUENTE: Ulrich,³⁰

La formación de huminas se halla sujeta a varios procesos complicados y, hasta la fecha, no completamente aclarados. Uno de tales procesos es la síntesis, que no será tratado en este capítulo. Veremos someramente los procesos denominados humificación biológica y abiológica.

Procesos químicos en la descomposición de la hojarasca

La transformación de los restos vegetales corre a cargo, principalmente, de hongos y bacterias, y se ilustra en la Fig. 17. En ella, se esquematizan dos procesos: mineralización y formación de huminas. A partir de los restos vegetales, se forman hidratos de carbono, albúmina y polifenoles (monómeros, restos celulares de bajo y alto peso molecular, como lignina) en presencia de oxígeno y con el concurso de la actividad respiratoria de microorganismos. El N, S y P contenido en las proteínas y protéidos serán convertidos en NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} y PO_4^{3-} . Paralelamente se forman huminas (Ulrich³⁰).

Humificación biológica

En la naturaleza tiene lugar la formación de huminas, es decir, la humificación, casi siempre bajo el influjo del edafón. El edafón transforma, con ayuda de sus enzimas, los polímeros de alto peso molecular, que son materias de partida (celulosa), en uniones más simples, a partir de las cuales se forman las huminas.

La humificación biológica tiene lugar en condiciones muy favorables, cuando se tiene un medio que va de débilmente alcalino hasta débilmente ácido, y bajo la presencia de altas cantidades de albúmina, frente a uniones solubles fenólicas, ya que sólo bajo estas condiciones se puede garantizar un desarrollo óptimo del edafón en el suelo. En este sentido, no solamente los microorganismos juegan un papel, sino también los pequeños animales del suelo, como por ejemplo los gusanos, los enchitreaeidos y otros (Williams y Joseph³¹). Las Figs. 17 y 18 esquematizan este proceso. En la última, se destaca la autoxidación, la cual no solamente origina polimerización —por influencia del oxígeno atmosférico— sino también despolimerización, es decir, no sólo formación de huminas sino su destrucción bajo la escisión de CO_2 y H_2O (Ulrich³⁰).

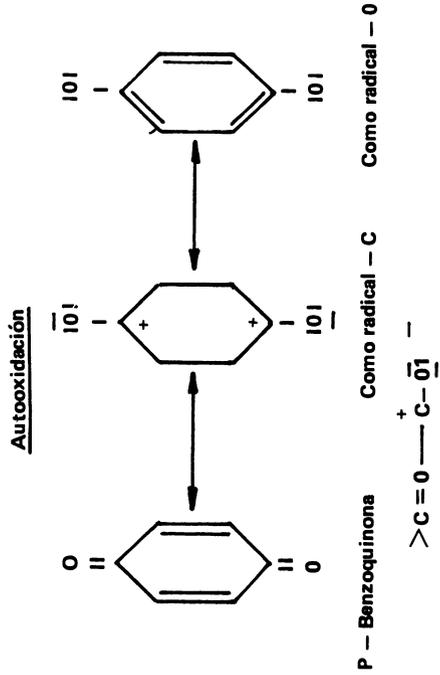
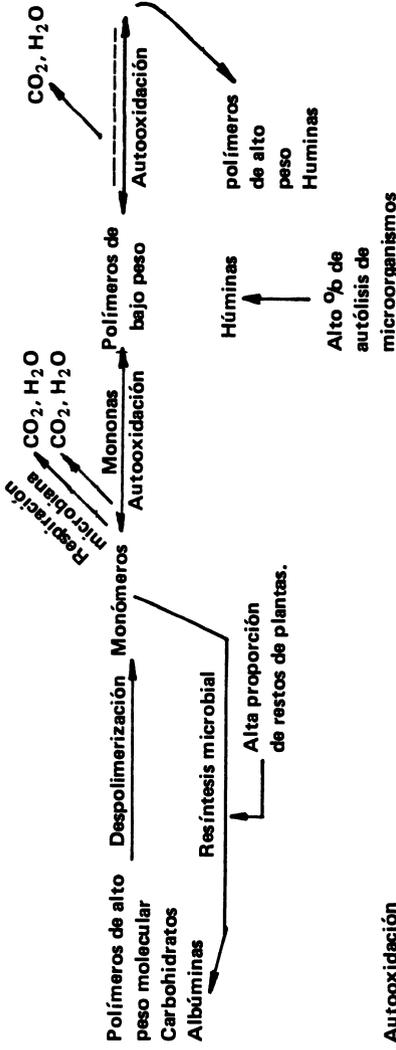


FIG. 17. Principio de la humificación biológica. FUENTE: Ulrich³⁰.

Humificación abiológica

La humificación abiológica tiene lugar sin la participación del edafón y es mucho más lenta que la humificación biológica. Esta se halla unida a un pH bajo y a un contenido de nitrógeno escaso en la materia orgánica. Un ejemplo típico de la humificación abiológica es la formación de un tipo de suelo orgánico, denominado **hochmoore**, en el cual la actividad biológica —en razón de las condiciones fuertemente anaeróbicas, un pH muy bajo y probablemente también por la presencia de cuerpos orgánicos limitativos— está sujeta a tales condiciones. La humificación abiológica juega también un papel importante en los suelos denominados **podzoles**. Esta humificación conduce principalmente a la formación de uniones de bajo peso molecular, como por ejemplo los ácidos fúlvicos y complejos albumino-tánicos (Fig. 18). En otros suelos, la humificación, tanto biológica como abiológica, influye en su metabolismo orgánico (Williams y Joseph³¹).

Procesos morfológicos en la transformación de la hojarasca y la humificación

Son procesos de transformación micromorfológicos, a través de la actividad orgánica, engranados a procesos químicos de transformación, ayudados por microorganismos, enzimas libres (biocatalizadores), partículas minerales de suelo con poder catalizador (óxidos, cuarzo) y oxígeno, que están unidos a una transformación de la estructura micromorfológica (visible microscópicamente). En la transformación morfológica pueden tener parte, según sus condiciones de vida, los siguientes organismos (Scheffer-Schachtschabel²⁷).

Macrofauna (1 cm): producen principalmente una descomposición mecánica. Están representados por lombrices, artrópodos, larvas de dípteros, gusanos, hormigas y termitas.

Mesofauna (0.01-1 cm): Representada por organismos con hábitos fagocitarios selectivos (coprófagos). Los enchittraeidos (gusanos blancuzcos de 5 a 30 mm de longitud) son predominantemente coprófagos y producen excrementos finos, con mezcla de arcilla y humus. Algunos artrópodos son resistentes a la sequía, como los oribáticos; los colémbolos, al contrario, requieren de humedad, comen principalmente el parénquima de las hojas y dejan cavernas a su paso.

Microfauna y flora: Se trata principalmente de una transformación bioquímica de sustancias en la hojarasca, como en el intestino, y deyecciones de la macro y mesofauna. Las bacterias, actinomicetos, hongos y algas juegan un papel muy importante en la transformación de la materia orgánica. El Cuadro 17 ilustra una distribución típica de microorganismos en un suelo mineral.

Estado biológico del suelo: Criterio importante para la evaluación del contenido de nitrógeno y de fósforo de un sitio, el estado biológico del suelo es tanto mejor cuando más abundante y rica en especies sea la biomasa.

CUADRO 17: Distribución típica de microorganismos (en 1000/g suelo) en un perfil de suelo mineral (según Stark, en Scheffer y Schachtschabel²⁴).

Horizonte	Profundidad cm	Bacterias		Actinomi- cetes	Hongos	Algas
		aerobias /	anaerobias			
A1	3 - 8	7800	1950	2080	119	25
A2	20 - 25	1800	379	245	50	5
A2/B1	35 - 40	472	98	49	14	0.5
B1	65 - 75	10	1	5	6	0.1
B2	135-145	1	0.4	—	3	—

DINAMICA DEL HUMUS

Factores que regulan la descomposición de la hojarasca y la humificación

En el curso de la descomposición influyen tanto el medio, en el cual ésta tiene lugar (factores del medio), como el sustrato que debe ser descompuesto (factores del sustrato).

Factores del medio (Espacio Poroso): Entendidos como el espacio vivo para organismos más grandes.

Volumen de poros gruesos (Poros de drenaje): Presión parcial de oxígeno en el aire: consumo de O₂ por respiración de raíces y organismos, unido con enriquecimiento de CO₂ del aire y procesos de oxidación. En las bacterias existen las facultativas anaerobias y obligadas.

Temperatura: Los organismos tienen un óptimo de 25 a 30°C. Organismos mayores son menos dependientes de la temperatura y pueden trabajar aún bajo capas de nieve. Jenny *et al*¹⁰ estudiaron las relaciones entre el contenido de materia orgánica y el clima, y demostraron que los factores más relevantes que influyen en su descomposición son el clima y la vegetación. Suelos con temperaturas adecuadas pueden mostrar una baja mineralización de la materia orgánica, debido a la deficiencia de P disponible, como lo demostraron Munevar y Wollum¹⁷ en suelos Andosóli colombianos.

Humedad: Los organismos son muy diferentes en sus requerimientos de humedad. Las bacterias exigen cerca del 90% de presión relativa de vapor, mientras que los hongos trabajan entre 80 y 90%; La sequía inhibe la actividad microbiana (Ulrich³⁰).

Exigencias nutritivas: El material descompuesto es más apetecido por los organismos que el material fresco.

Nutrimientos: Son necesarios en la misma medida, tanto para las plantas como para los microorganismos; pueden producirse deficiencias de N y P en los microorganismos.

pH: La mayor cantidad de especies está presente en pH neutros; con el aumento de acidez, disminuyen la fauna del suelo y las bacterias, y aumentan los hongos.

Factores de sustrato: La capacidad de descomposición de un sustrato (p.e. un tipo de hojarasca) depende de la clase, cantidad y forma de ligazón de las uniones orgánicas y anorgánicas, de las cuales se compone el sustrato. Con un abastecimiento suficiente de nutrientes aumenta la descomposición en la serie de la lignina-celulosa-azúcar; la albúmina es por lo general de fácil descomposición. Cuando la fuente de nutrientes del medio ambiente es insuficiente, el contenido de nutrientes del sustrato (p.e. ceniza) puede regular la velocidad de descomposición.

Composición mineral de la hojarasca: La hojarasca rica en nitrógeno y bases (en especial, calcio), se descompone mucho más rápido que las sustancias orgánicas pobres en estos elementos.

Substancias frenadoras: Algunos fenoles solubles en agua pueden retardar el desarrollo de las bacterias y afectar la fauna del suelo. A veces producen inactividad a través de la polimerización oxidati-

va, dependiente del pH, presión parcial de O_2 y efecto catalizador de las partículas minerales del suelo (Ulrich³⁰, Scheffer y Schachtschabel²⁷).

Relación C/N: El nitrógeno mineral aumenta más por hojarasca rica en albúmina que por resíntesis de sustancias microorgánicas. En hojarasca pobre en albúmina no se mineraliza suficiente nitrógeno por resíntesis, de manera que en el curso de la descomposición éste debe ser tomado del medio ambiente; de otro modo se frena la descomposición, ya que los microorganismos no pueden reproducirse. El carbono total y el nitrógeno total pueden relacionarse, habida cuenta de su mutua dependencia. Relaciones C/N mayores de 30 revelan condiciones malas de descomposición y formas desfavorables de humus.

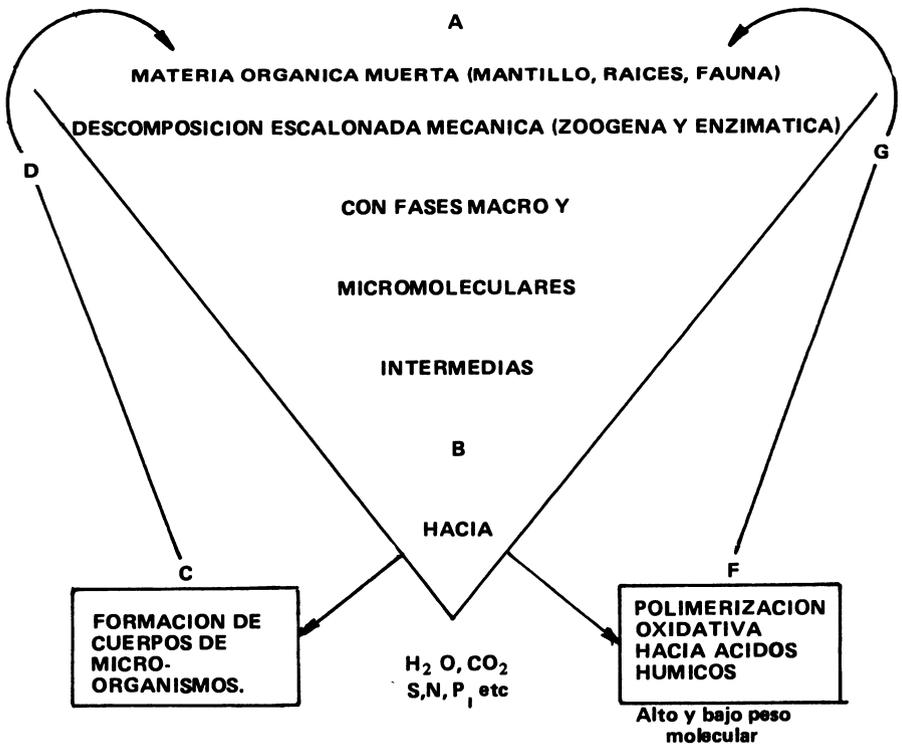


FIG. 18. Circulación de la materia orgánica en el suelo.
FUENTE: Foelster y Fassbender¹².

La Fig. 19 representa la transformación total de la materia orgánica en el suelo, incluyendo la descomposición mecánica (A) y enzimática (B) de la materia orgánica muerta hacia CO_2 y H_2O (así como productos de la mineralización intermedia), reabsorción de materias de bajo peso molecular, las cuales representan estadios intermedios de la descomposición, a través de microorganismos y fauna del suelo, subsiguiente formación de sustancia (C) y su correspondiente flujo hacia la cadena de descomposición (D); la figura también representa la polimerización de compuestos de bajo peso molecular hacia ácidos húmicos de alto peso molecular (F), los cuales están sometidos a una posterior descomposición (G) (Foelster y Fassbender¹²).

Regulación del proceso

1. A y B representan una función de la caída total de hojarasca (sustancia orgánica muerta). Bajo condiciones de equilibrio, la caída de hojarasca corresponde (incluyendo árboles muertos) a la producción total de sustancia orgánica en el sitio. Esta producción aumenta desde las zonas áridas hacia el bosque pluvial (valores de entre siete y doce toneladas por hectárea de biomasa aérea y de cinco toneladas por hectárea de biomasa radicular).

2. Los cambios, a través de las diferentes actividades biológicas en el sitio (A,B), tienen como consecuencia:

- a) descenso de la actividad biológica por razón de la acidificación, desaturación y escasez de N, P, S;
- b) escasez en el sitio de N (C-N) y P (C-P); éstos tienen como consecuencia el retraso de la descomposición y la acumulación de humus bruto y movilización de los ácidos húmicos;
- c) aumento de la actividad a través de la fertilización y enclavamiento.

3. El proceso continúa con la disminución de la oferta de sustancia orgánica (intervención humana).

4. El proceso presenta cambios posteriores en la fase F, a través de: polimerización inducida (dentro del medio iónico, rico en calcio y silicio); aumento de la estabilidad de los aminoácidos, a través de grados altos de polimerización o complejos húmico-arcillosos (especialmente montmorilonita). Un ejemplo lo brinda la ceniza volcánica de suelos calcimórficos (tierras negras, Vertisoles, Andosoles).

5. Con el aumento de la altura sobre el nivel del mar y la correspondiente disminución de la temperatura, se retrasa el proceso de descomposición de la materia orgánica (fases A y B de la Fig. 19); esta disminución de la descomposición es más fuerte que la producción de la misma. Este fenómeno puede observarse en la Fig. 20. La consecuencia es un aumento en el equilibrio del contenido de humus del suelo, acompañado de una fuerte tendencia a la formación de capas de humus.

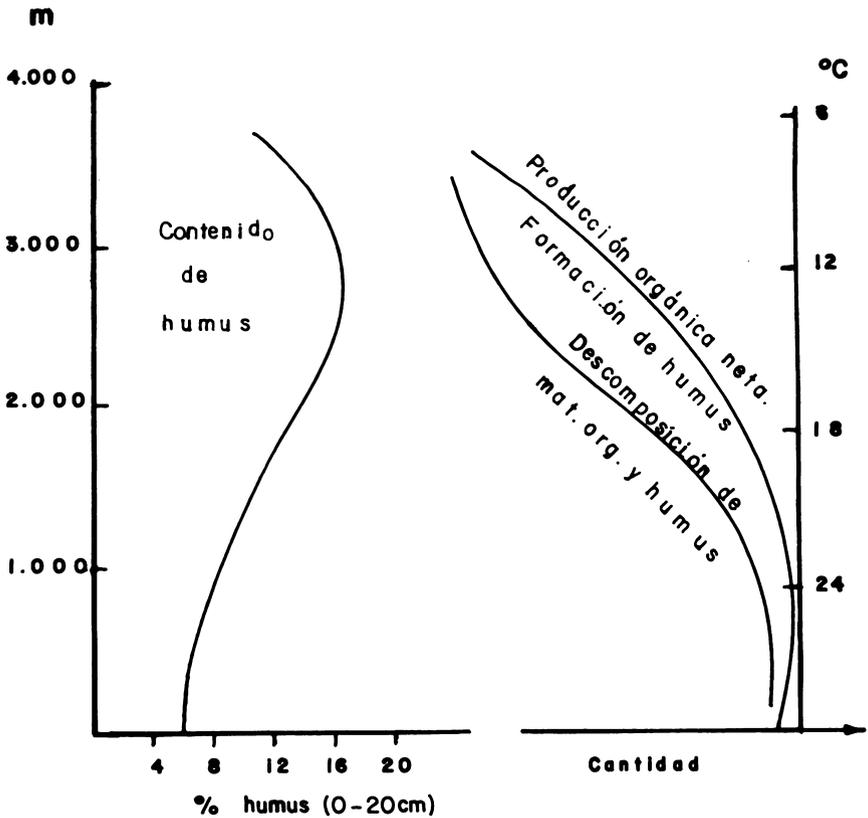


FIG. 19. Contenido de humus y tasas relativas de producción-descomposición de materia orgánica como función de la altitud s.n.m.
 FUENTE: Foelster y Fassbender¹²

6. El proceso de formación de humus está influido también por la vegetación. Los pastos tienen, por ejemplo, una alta descomposición de sus raíces y, por consiguiente, una formación de huminas en el suelo: horizontes Ah, los cuales son relativamente gruesos y ricos en polímeros de alto peso molecular. En los bosques se produce la descomposición, en gran medida, en el sistema intensivo radicular del suelo. En suelos derivados de cenizas volcánicas (Andepts), la alófana (mineral amorfo de aluminio) ejerce una fuerte influencia en la adsorción y estabilización de los compuestos orgánicos (Luna¹⁸).

Una relación importante en la dinámica del humus es la proporción carbono-nitrógeno, como se mencionó. Con la altitud, el nitrógeno total aumenta. Este fenómeno ha sido observado en la zona andina (Alexander y Pichot¹). La fuerte acidificación del suelo superior (pH alrededor de cuatro) puede pronunciarse desventajosamente también sobre la forma del humus. Relaciones C-N por encima de 12 deben mostrar, ya en la tierra baja tropical, condiciones desfavorables. Tales relaciones se obtuvieron a menudo en la región del Carare-Opón, región del Valle Medio del Magdalena con lluvia anual promedio de 3000 mm y temperatura de 27°C, Colombia, y otras regiones (Bartholomew, Meyer y Laudelot⁴; von Christen^{6,7,8}, De las Salas²⁴). Sobre la disponibilidad del nitrógeno, en tales sitios, son muy escasas las investigaciones. Los valores C-N de suelos agrícolas varían frecuentemente entre 9 y 14 (Fassbender¹¹).

Los ácidos húmicos del perfil orgánico del suelo

El término ácido húmico describe un grupo de sustancias que pueden ser extraídas del suelo por soluciones de hidróxido sódico, fluoruro sódico, oxalato sódico, urea y otros. En el proceso se forman precipitados amorfos con los ácidos. Se ha establecido, como se mencionó, que los ácidos húmicos tienen una estructura compleja. En su molécula existen compuestos de naturaleza fenólica o quinoidea y compuestos nitrogenados (como aminoácidos y péptidos). Durante la hidrólisis de los aminoácidos por intermedio de HCl, una gran parte del nitrógeno pasa a estado soluble (Lutz y Chandler¹⁹; Nye y Greenland²¹; Williams y Joseph³¹; Ulrich³⁰).

Las principales fuentes de las sustancias húmicas en el suelo son residuos orgánicos de plantas y animales. A pesar de que todas las plantas contienen los mismos grupos de sustancias (grasas, resinas, proteínas, complejos carbohidratados simples y compuestos, ligninas

y otros componentes), las proporciones de estas sustancias en las diferentes plantas varían extremadamente. Además de grupos carboxílicos (COOH), los ácidos húmicos contienen sustancias alcalinas y fenólicas, grupos alcohólicos (OH) y grupos metoxilo ($-\text{OCH}_3$).

Es importante anotar aquí que la capacidad tampón del suelo está, en gran medida, asociada con el hecho de que los ácidos húmicos son compuestos débilmente disociados.

Efectos benéficos de la materia orgánica

La materia orgánica del suelo tiene efectos benéficos sobre sus propiedades físicas y químicas. Los efectos más importantes han sido resumidos por Fassbender¹⁰ así:

- favorece la formación de agregados;
- aumenta la capacidad de retención de agua;
- aumenta la capacidad de intercambio catiónico;
- aumenta el intercambio de aniones, especialmente de fosfatos y sulfatos;
- favorece la disponibilidad de N,P y S, a través de los procesos de mineralización;
- regula el pH del suelo, al aumentar su capacidad tampón;
- puede formar complejos con los micronutrientes y evitar su lixiviación.

Wooldridge (citado por Pritchett²²) comprobó que la capa de mantillo vegetal actúa físicamente como aislante, para evitar temperaturas y humedad extremas, y ofrecer protección mecánica contra la erosión, al tiempo que aumenta la capacidad de infiltración. Fassbender¹⁰, Sombroek²⁸ y Williams y Joseph³¹ comentan que los minerales arcillosos, sobre todo el contenido de alófana, tienen un efecto estabilizador en la materia orgánica.

RELACIONES ECOLOGICAS DEL HUMUS DEL SUELO FORESTAL

El humus y el manejo del bosque

La silvicultura se encuentra hoy en un punto crítico de desarrollo. Las investigaciones de los últimos 100 años han demostrado que

una planeación forestal, como se encuentra hasta ahora, basada en los tratamientos silviculturales, necesitaba conocer también los efectos del suelo sobre el rendimiento de las plantaciones o sobre la fisonomía del bosque natural. No se ha observado ningún ascenso significativo en la producción, no obstante haber mejorado el incremento de los rodales y la calidad de la madera. La edafología forestal, entre tanto, ha traído consigo una copiosa serie de conocimientos y, con ellos, la clarificación de muchos fenómenos en el bosque. Aún permanecen desconocidas algunas relaciones suelo-planta. A través de los recientes conocimientos, se han abierto dos nuevos caminos para la intensificación de la ciencia forestal, los cuales ofrecen grandes aumentos en rendimientos que anteriormente apenas fueron viables. El primer camino intenta aclarar las propiedades particulares de cada lugar y su relación con la explotación dirigida, para seleccionar adecuadamente las especies y ejecutar las medidas más apropiadas de producción. Con ello, es posible lograr un mejor éxito en la economía forestal, considerando muchas variables. El segundo camino pretende aumentar de inmediato la productividad del suelo forestal, interviniendo en su regulación, sobre la base de su naturaleza y deficiencias. La mayoría de estos suelos no han sido todavía intervenidos por el hombre, mas lo serán en un futuro cercano. En el pasado, la intervención humana se limitó a la utilización de la hojarasca y al cultivo del bosque puro de coníferas (en la zona templada), en cierto sentido desfavorable para el suelo. La naturaleza ha acumulado capas en grandes superficies, cuyas condiciones para el desarrollo de un suelo productivo faltan de antemano. Puede tratarse, en general, de deficiencias nutricionales ocasionadas por relaciones inarmónicas entre los iones, o de calidades desfavorables heredadas del material parental. En los trópicos, las formas desfavorables de humus en el suelo han tratado de corregirse a través del manejo del suelo (abonadura verde, encalado, incorporación de leguminosas, quema controlada y otros).

Materia orgánica y nutrimentos

Las partículas coloidales de materia orgánica están cargadas negativamente y atraen iones cargados positivamente hacia su superficie. En condiciones templadas, la capacidad de retención de la materia orgánica es mayor que la de las arcillas. La materia orgánica también aumenta la capacidad tampón de los suelos. Los elementos nutricionales, como hierro, cobre y cinc, pueden formar complejos orgánicos por la formación de anillos moleculares en sus estructuras, en

las cuales los nutrimentos forman parte de este anillo en complejos metal-orgánicos. Estas sustancias son a veces inmovilizadas y no son asimilables por las plantas, aunque los complejos orgánicos se deshacen fácilmente. Por otra parte, adecuadas cantidades de boro están usualmente presentes en los suelos, cuando éstos contienen grandes cantidades de materia orgánica, hecho que oficia de indicación de que la materia orgánica puede proteger el boro contra un excesivo lavado, a través de formas no asimilables (Bartholomew, Meyer y Laudelout⁴ ; Williams y Joseph³¹).

Debido a la gran capacidad de intercambio catiónico de la materia orgánica, ésta es importante como centro de almacenamiento de nutrimentos. La materia orgánica juega también un papel directo en la fertilidad del suelo, como fuente de nutrimentos que son liberados durante la mineralización. La mineralización es una parte fundamental de los llamados ciclos del nitrógeno y del carbono, pero es imposible separar tales ciclos en la naturaleza, debido a que están íntimamente asociados. Las transformaciones de nitrógeno dependen, en su mayoría, de la energía derivada del ciclo del carbono, además de las condiciones del suelo. Si ocurre una inmovilización más rápida que la mineralización en el suelo, entonces escaseará el nitrógeno disponible y el crecimiento biológico será menor. Si ocurre lo contrario, el nitrógeno aumentará y los períodos de crecimiento serán más rápidos. Por eso, la mineralización de nitrógeno es muy importante en la agricultura. A menudo, la materia orgánica del suelo contiene mucho menos fósforo que nitrógeno, pero en suficiente cantidad en muchos suelos. Dentro de los compuestos fosfóricos en la materia orgánica, se encuentran los fosfatos de inositol, los ácidos nucleicos y sus derivados, y los fosfolípidos. El ciclo del fósforo es similar en algunas partes al ciclo del nitrógeno. Cuando la proporción carbono-fósforo es grande, pueden ocurrir grandes inmovilizaciones de fósforo asimilable. Cuando tal proporción es pequeña, pueden ocurrir pequeños aumentos en el fósforo inorgánico (Fassbender¹⁰).

Materia orgánica y estructura del suelo

Las funciones más conocidas de la materia orgánica son aquéllas relacionadas con las propiedades físicas del suelo. Un adecuado nivel de materia orgánica mejora los suelos de textura muy pesada y también los de textura muy gruesa. Ha sido reconocido, por largo tiempo, el hecho de que la materia orgánica sirve como un granulante en los suelos. Existe una alta correlación entre la materia orgánica y la

agregación en suelos que contienen menos de un 25% de arcilla. La capacidad de infiltración del suelo puede mejorarse con la incorporación de materia orgánica; este efecto benéfico es causado por una mejor estructuración (estructura de agregados) y por la estabilización de dichos agregados en el suelo. Como resultado de la agregación de los suelos pesados, debido a una mejor estructura ocasionada por la materia orgánica, la distribución del tamaño de los poros es una condición deseable para el balance entre los poros capilares y los no capilares. En los suelos arenosos, la aireación es buena, pero la capacidad de retención es baja. Aquí, la materia orgánica le confiere al suelo una capacidad de retención de agua mayor, al incrementar su espacio poroso capilar.

El mejoramiento temporal del suelo, debido a la materia orgánica, puede explicarse por la acción de células microbianas, pero es posible que una estructura más permanente se halle caracterizada en aquellos suelos por otras causas. Los suelos de praderas, por ejemplo, tienen una mejor estructura de agregados que los suelos arables, debido a las grandes cantidades de raíces de pasto. Estas raíces proveen, además, una fuente continua de alimento para microorganismos y gusanos y otros organismos, y sus productos generan agregados mucho más estables en los suelos arados. Es necesario tener en cuenta que el nivel de la materia orgánica en el suelo está en equilibrio, equilibrio que se determina por el clima prevaleciente, la vegetación y el sistema de manejo del suelo. En los trópicos, las técnicas del manejo de ganado y de cultivos tienen que tomar en cuenta estos principios.

Materia orgánica y vegetación natural en los trópicos húmedos

Es bien sabido que, en los trópicos húmedos, sobre todo en la vegetación boscosa, se sucede un ciclo cerrado de nutrimentos, el cual es responsable de la exuberancia de las pluviselvas tropicales. De los nutrimentos, el potasio es el que se lava desde las hojas con mayor facilidad y se recicla con mayor rapidez. La descomposición de la hojarasca en ambientes tropicales se sucede rápidamente, debido a las condiciones propicias del clima (temperatura) para los organismos descomponedores. La hojarasca forma un colchón sobre la superficie del suelo, el cual reduce la erosión y la escorrentía superficial. La acción del bosque puede ser considerada como una bomba gigantesca, en la que se sucede el ciclo continuo de nutrimentos, a partir del suelo, del subsuelo y de su almacenamiento en los diferentes estratos de la vegetación y, parcialmente, en el sistema radical intensivo del

suelo. El suelo se mantiene en un estado en el cual el agua de infiltración y el aire se incrementan, a la vez que disminuye la erosión y la lixiviación. Cuando se remueve y quema el bosque, todos los elementos nutritivos, excepto el nitrógeno y el azufre, se depositan en la superficie como ceniza; el nitrógeno, el azufre y el carbono se pierden parcialmente como gases. Esto trae como consecuencia cambios fundamentales en el sistema. Estos cambios han sido reportados en numerosas investigaciones y por lo tanto no son objeto de especial análisis en este capítulo (ver, por ejemplo, Bartholomew, Mayer y Laudelout⁴; Ewel *et al*⁹; Laudelout¹⁶; Nye y Greenland²¹; de las Salas^{24, 25}; Sánchez²⁷).

La existencia de un ciclo casi cerrado de nutrimentos entre el bosque tropical maduro y el suelo, fue reconocida inicialmente por Hardy en Trinidad.

Almacenamiento de nutrimentos en la vegetación del bosque húmedo siempre verde

Los datos sobre biomasa total, en el bosque maduro tropical siempre verde, oscilan entre 200 y casi 1000 toneladas por hectárea de materia seca.

Según estudios realizados en los trópicos americanos por diferentes investigadores, el 75% de la biomasa consiste de ramas y troncos, un 15 a 20% de raíces, 4 a 6% de hojas entre 1 y 2% de hojarasca (Foelster y Fassbender¹²; Williams y Joseph³¹). Estudios realizados en sucesiones forestales secundarias, en el área centro y sudamericana, demuestran que la tasa de acumulación de materia seca, durante el rebrote forestal después de talar y quemar el bosque, es de alrededor de 10 toneladas por hectárea y por año, en el curso de los primeros nueve años (Tergas y Popenoe²⁹; Sánchez²⁶). Los estudios de Bartholomew, Meyer y Laudelout⁴ en el Congo, indican que un 90% de la biomasa máxima se logra durante los primeros ocho años de rebrote forestal. Aun cuando en este capítulo no se trata en detalle el aspecto del almacenamiento y reciclaje de nutrimentos en los ecosistemas forestales, es necesario mencionar la importancia relativa del suelo y la vegetación como almacenadores de nutrimentos. En el libro clásico de Nye y Greenland²¹, se mencionan numerosos datos, analizados a la luz de experimentos conducidos por muchos años en Africa Tropical. Medidas directas de nutrimentos, en todos los componentes forestales de un bosque secundario de 40 años, en Ghana,

arrojaron los siguientes datos: de 60 toneladas/hectárea de materia seca, se acumularon las siguientes cantidades de bioelementos: N: 1830 kilogramos/hectárea; K: 819 kilogramos/hectárea; Mg: 346 kilogramos/hectárea; P: 125 kilogramos/hectárea; Ca: 2524 kilogramos/hectárea.

Otras cifras referidas a América Tropical, comparadas con África, se dan en el Cuadro 18. De este cuadro, se deduce la gran variabilidad del contenido de nutrimentos y de la biomasa de los diferentes bosques tropicales del mundo. La transferencia de la biomasa de la vegetación al suelo, varía de 4,6 a 12,5 toneladas/hectárea/año y, con ella, se transfieren los siguientes contenidos de nutrimentos (kilogramos/hectárea/año): N 57 a 228; P 2 a 16; K 5 a 103; Ca 18 a 206 y Mg 12 a 45. Para evaluar completamente la economía de los nutrimentos en el bosque, es importante conocer el inventario de los elementos nutritivos también en la capa del humus y en el suelo mineral. El Cuadro 19 representa la participación en la reserva de nutri-

CUADRO 18: Producción anual de hojarasca y aporte de nutrimentos al suelo en algunos bosques tropicales nativos (ver también Cuadro 15).

Región	Materia Seca t/ha/año	Kg/ha/año				
		N	P	K	Ca	Mg
Mérida, Venezuela ¹	4.6	57	3	20	31	12
Magdalena, Colombia ² (bosque sec. 16 años)	9.5	108	2	29	58	18
Manaos, Brasil ³	7.3	106	2	13	18	13
Trinidad ⁴	7.5	98	3	5	68	14
Karnataka, India ⁵	4.2	67	16	14	50	20
Ghana ⁶	10.5	199	7	68	206	45
Usambara, Tanzania ⁷	8.8	142	8	35	104	23
Congo ⁸	12.5	228	4.6	103	127	38

FUENTE:

- 1 Fassbender, 1977.
- 2 Salas, de las 1978.
- 3 Fittkau, E.J.; Klinge, H. 1973. *Biotrópica* 5:2-14
- 4 Cornforth, J. S. 1970. *J. appl. Ecol.* 7:602-608
- 5 Rai, S. N.; Proctor, J.J. *of Ecology* (en prensa)
- 6 Greenland, D.J.; Kowal, J.M.L. 1960. *Plant and Soil* 12:154-174
- 7 Lundgren, 1978. *Reports on For. Ecol. and For. Soils* No. 31. Swedish Univ. Agric. Sci. Upsala, Suecia
- 8 Laudelout; Meyer. 1954. *Trans. 5 Congr. Soil SSc. Leopoldville* (fotocopia)

mentos de la vegetación del litter de las raíces y del suelo mineral, en varios ecosistemas tropicales americanos (Brasil, Jamaica, Colombia, Costa Rica y Venezuela). Dichos valores indican la gran variabilidad de la distribución del capital nutritivo, entre los tres componentes de estos ecosistemas. En los Caps. 7 y 10 se trata el tema con detalle.

Ciclo de nutrimentos

Para estudiar los ciclos de los elementos nutritivos en los ecosistemas, se analizan los procesos de transferencia de los compartimientos que conforman dichos ecosistemas. Interesan, por lo tanto, como medios de transporte, el agua (lluvia, lavado foliar, escurrimiento por el tronco, escorrentía superficial, drenaje e infiltración) y la hojarasca (producción de restos vegetales, descomposición y liberación de elementos nutritivos). Hay muchos trabajos escritos sobre el tópico y se aconseja al estudiante consultarlos para mayor detalle (ver también Caps. 7 y 10). Es importante anotar que la acumulación de nutrimentos en el bosque tiene lugar rápidamente durante los primeros cinco años de crecimiento y después desciende en las sucesiones posteriores. Este modelo parece constante en los cambios de crecimiento observados en las comunidades vegetales.

La remoción de nutrimentos de la vegetación ocurre como caída de hojarasca y lixiviación de las hojas por la lluvia y a partir del lavado en la zona profunda del suelo. En la mayoría de las zonas tropicales, la producción neta anual es del orden de seis toneladas de materia seca por hectárea y año; y se ha calculado que el ciclo anual de nutrimentos expresado como porcentaje del capital almacenado en la vegetación es del siguiente orden (Nye y Greenland²¹): N: 11%; P: 11%; K: 32%; Ca: 12%; Mg: 18%.

El humus bajo bosque en relación con el clima, el suelo y las especies

El clima perhúmedo sin períodos secos influye, a pesar de la alta temperatura del aire, la actividad biológica y, por consiguiente, la mineralización de la materia orgánica. Como consecuencia, se registran, en los suelos mejor aireados, valores de humus relativamente altos en el suelo superior. En 20 perfiles investigados en Colombia se encontró un contenido de carbono de 5 a 8% (0-10 cm), en la capa infe-

rior (10 a 20 centímetros) de aproximadamente 2% y en el suelo inferior (20-50 cm) de 1%. Los suelos compactos muestran, por el contrario, los mismos bajos valores que en las pocas regiones húmedas (1 a 3%). Humus bruto se observó varias veces, únicamente en las montañas, a partir de 500 metros sobre el nivel del mar. Sólo allí, también, es más frecuente el horizonte F, seguido de un horizonte húmico blanqueado y de una delgada banda de hierro (von Christen^{6,7,8}). Andriese³, en sus trabajos en Sarawak (Sudeste de Asia), comprobó que la presencia de horizontes húmicos iluviales está asociada, en muchos casos, con la existencia de una capa de agua, mientras que las causas de acumulación de humus se debían a la falta de movimiento lateral del agua de fondo. Un fenómeno similar se observó en zonas altas de Colombia bajo bosque original de roble (*Quercus humboldtii*), en suelos pseudogleyizados podsolizados.

Como la mineralización de la materia orgánica disminuye y la humificación aumenta por el descenso de la temperatura, se observa un incremento del contenido del humus en el suelo con el aumento en altura en las montañas. Debido a las fluctuaciones insignificantes de la temperatura en el curso del año, se puede considerar como medida la temperatura promedio anual, para la intensidad de la descomposición de la materia orgánica en los trópicos. En alturas elevadas, digamos 2500 metros sobre el nivel del mar, la temperatura (14°C) está lejos del óptimo para la actividad biológica en el suelo y es similar a la temperatura de Europa Central durante el período de crecimiento.

La cantidad y distribución de la lluvia puede modificar fuertemente los procesos biológicos en el suelo. Un clima permanentemente húmedo puede reducir la descomposición de la materia orgánica, mientras un clima estacional estimula la mineralización. En las grandes alturas, con temperaturas bajas y permanente humedad, se encuentran condiciones muy desfavorables para la descomposición y, por lo tanto, se presentan las mayores acumulaciones de humus bruto.

Las características químicas del suelo también influyen en los procesos biológicos, a través del contenido de nutrimentos en los minerales y en las hojas. Un suelo relativamente fértil, bajo bosque natural, está cubierto por una capa de **mull** (humus más valioso), mientras que un suelo muy ácido está cubierto por **moder**. En Nueva Zelanda se utilizan los tipos de humus mull y moder, como uno de los criterios para la clasificación de los suelos de ladera (Leamy y Panton¹⁷).

En Colombia, y probablemente en otros países de América Tropical, se puede estudiar el humus bajo condiciones originales en pocos sitios, como consecuencia de la destrucción de los bosques. En general, predomina un tipo de humus desfavorable (moder).

La descomposición de la hojarasca no está influida solamente por el clima y el suelo sino, también, por la especie del árbol de que proviene. Hojas anchas mineralizan más rápido que las agujas de las coníferas; en gran parte, debido a su mayor contenido de nitrógeno y bases. Sin embargo, la diferencia es menos notable en los suelos pobres.

Entre las mismas especies latifoliadas, hay también diferencias importantes en la descomposición de las hojas, según su fórmula química y su estructura. Especies como *alnus* o las leguminosas forman una hojarasca biológicamente muy valiosa, capacidad de la que carecen las hojas cariáceas del bosque natural de las zonas altas, por descomponerse lentamente. Entre las coníferas se conoce una diferencia muy marcada en la descomposición de las agujas de ciprés y pino pátula.

Bajo los bosques de las montañas tropicales húmedas, la acumulación superficial de materia orgánica alcanza varios cientos de toneladas por hectárea, si se trata de moder, y considerablemente menor si es de mull. Bajo coníferas en Alemania, el humus bruto de *Picea*, pesa cerca de 100 toneladas; pero, en casos excepcionales, puede llegar hasta 170 toneladas. En las montañas sub-tropicales de Sudáfrica, el pino forma un humus bruto pero en menores cantidades. En general, oscila entre 20 y 30 toneladas, aunque fueron observadas cantidades de hasta 100 toneladas (von Christen^{6, 7, 8}).

La diferencia química entre mull y moder se manifiesta en general por la mayor acidez, mayor relación C-N, menor capacidad de intercambio catiónico y menor saturación de bases del moder (Cuadro 19).

El humus bruto de pino se distingue del moder por ser mayor su relación C-N y menor su CIC, ambos indicadores de una descomposición muy incompleta.

En la cordillera, el moder del bosque natural libera una cantidad mayor de ácidos orgánicos no saturados que el humus bruto del pino en el Sur de Africa; por lo tanto, es capaz de promover procesos de podsolización más fácilmente (von Christen^{6, 7, 8}).

CUADRO 19: Características químicas de los tres tipos de humus más importantes.

Sitio	Tipo de humus	Tipo de suelo	Horizonte	pH	C %	C/N	C.I.C. BT	me/100	S
—									—
1.	Mull	(<i>Eutrocept</i>) <i>Diabasa</i> fresca	A _{h1}	5.8	20.4	11.0	164	112	68
			A _{h2}	6.1	3.0	—nd	100	64	64
—									—
2.	Moder	(<i>Humox</i>) <i>Diabasa</i> <i>saprolita</i>	0	3.3	24.9	13.0	136	11	8
			A _h	4.2	10.2	13.1	76	7	9
—									—
3.	Humus-Bruto	(<i>Humox?</i>)	0 _h	3.4	44.3	35.4	28	1	4
			A _h	3.5	6.7	15.6	7	0.5	8

C.I.C. : Capacidad de intercambio catiónico

BT : Bases de cambio

S : Saturación de bases (BT/CIC x 100)

nd : no determinado

Características de los sitios:

1 y 2: Río Nima, Colombia, 2200 m/ 2000 mm, bosque nativo (C.V.C.)

3: Transvaal del Este, Sur Africa, 1300 m/ 900 mm , Pinus Patula.

FUENTE: Adaptado de von Christen^{6,7,8}.

FORMAS DE USO DEL SUELO Y SU INFLUENCIA SOBRE LA MATERIA ORGANICA

La descomposición del humus, la transformación de los nutrientes y pérdidas en la fase de cultivo

Después de talar y quemar el bosque, se da un descenso en la productividad del suelo. La velocidad de tal descenso depende de las propiedades del suelo (humus, nivel de nutrientes, arcilla, pH, estabilidad de agregados y microorganismos); depende también del cultivo que se siembra inmediatamente después de la quema, de la intensidad del uso del suelo y de las medidas de conservación del mismo. Un caso extremo de pérdida de la productividad del suelo se menciona

para el Congo, con cultivos de maní en la segunda cosecha: la pérdida de la productividad fue del 86%; mientras que en Ghana, sólo después de 8 años, se comprobó una pérdida del 25% en cosechas de maíz y yuca. Otros datos, para diferentes suelos, cosechas y regiones, están entre estos dos extremos (Foelster y Fassbender¹²). En Yurimaguas, Perú, se comprobó una pérdida en la producción de arroz de 2,9 a 0,2 toneladas por hectárea (Sánchez²⁶). Una formulación matemática para el agotamiento del suelo, al menos en lo que concierne al humus y los nutrimentos, sólo puede darse en forma condicionada, según la región de investigación. El Cuadro 20 ilustra las tasas de descomposición del humus, en las primeras capas del suelo, de 11 diferentes sitios de bosque lluvioso y sabana (Trinidad, Ghana, Ceilán, Uganda, Kenya y Senegal), bajo diferente utilización del suelo (desde cultivos permanentes hasta agricultura migratoria). Las tasas de descomposición del carbono oscilaron entre 2,5 y 25% al año, con un promedio de 10%. Correlativamente, el tiempo de reducción del capital del humus a la mitad osciló entre tres y 28 años. Las grandes oscilaciones de las tasas de descomposición de la materia orgánica deben atribuirse a las diferentes propiedades de los sitios, a la vegetación y al clima bajo diferentes métodos de cultivo y manejo de la vegetación. La información restringida no permite por el momento ninguna generalización.

CUADRO 20: Descomposición del humus en sitios de bosque y sabana tropical por agricultura nómada y cultivo.

No.	Vegetación	Sitio	Cultivo	Años	% C	% N	% $K_C^{+1/}$	2/
1	Bosque montano pluvial	Trinidad	Agricultura nómada	0	1.57 1.15	0.06 0.05	14.5	5
2	Bosque sec. joven	Trinidad	Maíz Leguminosas	0 6	1.02 0.84	0.13 0.11	3.2	22
3	Bosque sec. siempre verde	Ghana	Maíz yuca	0 8	2.19 1.50	0.164 0.128	4.8	14
4.	Bosque lluvioso caducifolio	Ghana	Yuca	0 6	2.12 1.63	0.191 0.148	4.4	16
5	Bosque lluvioso caducifolio	Ceylan	Agricultura migratoria	0 2	2.55 2.15	0.218 0.187	8.3	8
6	Bosque lluvioso caducifolio	Ceylan	Agricultura migratoria	0 2	1.32 1.13	0.117 0.104	7.5	9

Continuación Cuadro 20/21

No.	Vegetación	Sitio	Cultivo	Años	% C	% N	%K _C ⁺ 1/	2/
7a	Bosque lluvioso caducifolio	Ghana	Cultivo con sombra	3	1.44	0.155	15.8	4
b			A pleno sol	3	1.03	0.117	25.0	3
c			Pasto	3	1.11	0.121	22.6	3
d			cacao con sombra	12	1.71	0.178	2.5	28
8	Bosque lluvioso caducifolio	Uganda	Algodón sorgo-crotalaria	0	3.30	0.292		
				17	0.97	0.080	6.5	11
9	Bosque lluvioso caducifolio	Kenya	Maíz	0	1.20	0.13		
			Macuna	4	0.42	0.04	23.1	3
10	Sabana arbustiva	Senegal	Sorgo maní	0	0.75	0.15		
				6	0.50	0.15	6.8	10
11	Sabana arbustiva	Ghana	Dioscorea maní-camote	0	0.36	0.034		
				6	0.28	0.025	4.0	17

1/ % K_C Tasa porcentual anual de pérdida de C orgánico en el tiempo de cultivo.

2/ Años estimados para el 50% de descomposición.

FUENTE: Jagnow, citado por Foelster y Fassbender¹⁰.

Cambios climáticos después de la tala rasa

El calor, el aire y el contenido de agua de los ecosistemas experimentan, en la fase de cultivo, por razón de la tala rasa del bosque y del impacto de la lluvia, una serie de cambios. En la transformación de un bosque en sabana, en la localidad de Cañas, Costa Rica, Duabemire (citado por Foelster y Fassbender¹⁰), comprobó que la temperatura máxima en la sabana era de hasta 19°C más alta que bajo bosque. En Mérida, Venezuela, se comprobó el mismo fenómeno, así como también influencias de la actividad biológica del suelo.

Regeneración y productividad del suelo en el barbecho

La regeneración natural del suelo lleva consigo un enriquecimiento de la materia orgánica en la vegetación secundaria y, con ello, también en la parte superior del suelo; de esta manera se restablece la circulación del humus y de los nutrimentos en el ecosistema. En este

período de regeneración, se ha comprobado un cambio gradual (en la vegetación secundaria pionera) de la composición florística (de acuerdo con la edad, utilización, clima y suelo de la región), así como una acumulación de nutrimentos que depende del tiempo. Según investigaciones llevadas a cabo en el Congo, la producción de hojas alcanza, después de dos años, su más alto valor; más tarde se suceden enriquecimientos en la biomasa de madera. Las raíces alcanzan, después de 5 años, un 75% de los valores totales (Nye y Greenland²¹). También se suceden, periódicamente, enriquecimientos de la sustancia orgánica en la vegetación. Después de 16 a 20 años, la biomasa alcanza entre 120 y 200 toneladas por hectárea (Región Carare, Colombia). Los enriquecimientos del capital de nutrimentos en la vegetación secundaria de bosques tropicales (Colombia y Zaire), alcanzó los siguientes tenores a la edad de 16 a 20 años: 400 a 800 kilogramos N, 40-60 kilogramos P, 300-350 kilogramos K, 300-700 kilogramos Ca + Mg/hectárea (Bartholomew, Meyer y Laudelout⁴; de las Salas^{24,25}). Los resultados obtenidos en varias parcelas experimentales (después de talar y quemar el bosque) en el Carare, Colombia, para los primeros 10 centímetros del suelo, son similares a los obtenidos en Costa Rica.

Respecto del aumento de humus durante la regeneración, se ha desarrollado una ecuación logarítmica, cuya fórmula es la siguiente:

$$p = 1/k \ln A/A - k \times C$$

en la cual:

- p = tiempo de barbecho en años;
- k = constante de descomposición en porcentaje por año;
- A = la adición anual de humus (C) en kilogramos por hectárea;
- C = el contenido actual de carbono en kilogramos por hectárea.

Según esta fórmula, se esperan en los primeros años aumentos apreciables de humus.

Definición de los tipos de humus más comunes observados en Colombia, según la clasificación alemana (Kubiena¹⁵):

1 Tipos terrestres de humus

- 1.1. Descomposición rápida de la hojarasca y mezcla intensiva del humus y suelo mineral.

1.1.1. MULL

Humus que se forma predominantemente por la actividad zoogénica, en especial por lombrices. La mayor parte consiste de sustancias húmicas mezcladas con el suelo mineral.

El horizonte O_L (hojarasca poco alterada) es delgado y está directamente sobre el horizonte A_h .

El A_h es bien oscuro, profundo y migajoso.

- 1.2. Descomposición retardada de la hojarasca y mezcla incompleta o ausente del humus y suelo mineral.

1.2.2. MODER

Humus que se forma todavía por la actividad zoogénica y por la presencia insignificante de las lombrices o por las características desfavorables de la hojarasca, pero de mezcla incompleta con el suelo.

La profundidad de los horizontes dentro del humus ($O_L - O_F - O_H$) es a menudo similar. Los límites entre estos horizontes y entre O_H y A_h son poco nítidos.

O_H todavía contiene residuos vegetales con estructuras de fácil reconocimiento. El horizonte no está ligado por hifas de hongos que se desintegran en pedazos, al presionarlos entre los dedos.

1.2.3. HUMUS-BRUTO

Humus en el que predomina la descomposición por hongos. Los horizontes O_F y O_H están fuertemente ligados por hifas de hongos, de modo que se desintegran en pedazos angulares por simple contacto. Límites nítidos entre O_H y A_h . A veces existe horizonte O_H delgado.

El "Humus-Bruto" puede subdividirse en O_H rico, y pobre en "Humus Menudo".

2. Tipos Semiterrestres de Humus

MODER MOJADO (*Feuchtmoder*)

Humus que se forma bajo la influencia de alta hume-

dad y alta acidez. La descomposición de la hojarasca es impedida.

El moder mojado es mohoso, pringoso y en general pardo-rojizo, sin diferenciación marcada de horizontes.

(Típico para los bosques naturales de la zona alta muy húmeda).

RESUMEN

1. La materia orgánica es producida en gran parte por las plantas (a través de sus restos) y los microorganismos del suelo, por intermedio de la fotosíntesis y otros procesos.
2. Los componentes más comunes de la materia orgánica son polisacáridos, incluyendo celulosa, hemicelulosa, ligninas, sustancias pépticas, proteínas y otros componentes nitrogenados.
3. En el suelo se encuentran materiales no humínicos y huminas. Los productos de transformación de las sustancias no humínicas son: a) huminas, b) ácidos orgánicos de bajo peso molecular, c) compuestos inorgánicos como CO_2 , H_2O , nitratos y fosfatos.
4. Los polisacáridos participan entre 5 y 30% de la materia orgánica y los poliurónidos entre 2 y 5%. Del nitrógeno total, un 5 a 10% se encuentra en forma de azúcares aminados.
5. La transformación de restos vegetales tiene su expresión en la mineralización y en la formación de huminas.
6. La humificación biológica es más importante que la abiológica y se realiza en condiciones favorables, cuando se tiene un medio débilmente alcalino y la presencia de altas cantidades de albúmina.
7. Los factores principales que regulan la descomposición de la hojarasca y la humificación corresponden al medio (espacio poroso, temperatura, humedad, nutrimentos y pH) y al substrato (composición mineral de la hojarasca, incluyendo nitrógeno, bases y sustancias frenadoras).

8. La transformación de la materia orgánica en el suelo es un proceso de descomposición escalonada mecánica (zoógena) y enzimática, con fases macro y micro-moleculares intermedias de la materia orgánica muerta, hacia la formación de H_2O y CO_2 . Los cuerpos de microorganismos entran también en la cadena de descomposición. Paralelamente, se da la polimerización de compuestos de bajo peso molecular hacia ácidos húmicos, los cuales serán sometidos a una posterior descomposición.
9. El proceso de descomposición de la materia orgánica se retrasa con el aumento de la altitud y el descenso de la temperatura.
10. La materia orgánica del suelo tiene efectos benéficos sobre sus propiedades físicas y químicas. Entre ellos, cabe destacar que: a) favorece la formación de agregados; b) aumenta la capacidad de retención de agua y de intercambio catiónico; c) favorece la disponibilidad de N, P y S a través de los procesos de mineralización.
11. Las formas desfavorables de humus en el trópico han tratado de corregirse a través del manejo del suelo (abonadura verde, encañado, incorporación de leguminosas, quema controlada y otros).
12. La materia orgánica es importante como centro de abastecimiento de nutrimentos, debido a su gran capacidad de intercambio catiónico. Juega también un papel directo en la fertilidad del suelo, como fuente de nutrimentos, al liberar éstos durante la mineralización.
13. La biomasa total, en el bosque maduro tropical siempre verde, oscila entre 200 y casi 1000 toneladas por hectárea de materia seca. De este total, el 75% corresponde a ramas y troncos; 15 a 20% a raíces; 4 a 6% a hojas y 1 a 2% a hojarasca.
14. Los tres tipos principales de humus en el bosque son el humus bruto, el moder y el mull. En los bosques tropicales generalmente se encuentra moder.
15. La diferencia química entre el mull y el moder se manifiesta en general por la mayor acidez, mayor relación C-N, menor capacidad de intercambio catiónico (CIC) y menor saturación de bases del moder. El humus bruto de las coníferas se distingue del moder por ser mayor su relación C-N y menor su CIC, ambos indicadores de una descomposición muy incompleta.

16. La tumba y la quema del bosque ocasionan un descenso en la productividad del suelo. La velocidad de tal descenso depende de las propiedades del suelo (humus, nivel de nutrimentos, arcilla, pH, estabilidad de agregados y microorganismos), del cultivo utilizado después de la quema, de la intensidad del uso del suelo y de las medidas de manejo y conservación del mismo.

17. Las tasas de descomposición del carbono en 11 sitios de bosque lluvioso y sabana de Africa, Asia y el Caribe, bajo distinta utilización del suelo, oscilaron entre 2.5 y 25%/año con un promedio de 10%. El tiempo de reducción del capital de humus a la mitad de su valor inicial osciló entre tres y 28 años.

BIBLIOGRAFIA

1. ALEXANDER, E.B.; PICHOT, J.J. 1979. Soil organic matter in relation to altitude in equatorial Colombia. *Turrialba* 29(3):183-188.
2. ALLISON, F.E. 1973. Soil organic matter; its role in crop production. Amsterdam. Elsevier. 637 p. (Developments in Soil Science 3).
3. ANDRIESE, J.P. 1969. A study of the environment and characteristics of tropical podzols in Sarawak (East Malaysia). *Geoderma* 2(3):201-207.
4. BARTHOLOMEW, W.V., MEYER, J.; LAUDELOUT, H. 1953. Mineral nutrient immobilization under forest and grass fallow in the Yangambi (Belgian Congo) Region. Bruselas. INEAC. Serie Sci No. 57. 27 p.
5. BRAY, J.R.; GORGAHM, E. 1964. Litter production in forests of the world. p. 101-157. In Cragg, J.B. (ed.). *Advance. Ecol. Res.* 2a. ed. New York. Academic Press.
6. CHRISTEN, H. VON, 1964. Some observations on the forest soils of South Africa. *Forestry in South Africa* (5):1-21.
7. _____. 1976. Clasificación y evaluación de los sitios de la tierra baja húmeda de Colombia para el manejo forestal, con especial consideración de los suelos hidromórficos. Enfoques Colombianos; Temas Latinoamericanos. Monografía No. 8: Suelos del trópico. Bogotá. Fundación Friedrich Naumann. p. 9-103.
8. _____. 1978. Aspectos edafológicos sobre el manejo de las plantaciones de coníferas en las cordilleras colombianas. Bogotá. Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal. Manuscrito no publicado. 21 p.

9. EWEL, J. *et al.* 1980. Slash and burn impacts on a Costa Rican wet forest site 32 p. más anexos (mimeo).
10. FASSBENDER, H.W. 1975. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Turrialba, Costa Rica. IICA. Libros y Materiales Educativos No. 24. 398 p.
11. _____ .1977. Ciclos de elementos nutritivos en ecosistemas forestales y su transformación con la agricultura rotativa. FAO-SIDA. Conferencia sobre ordenación y manejo de suelos tropicales. Lima, Perú, 3-15 octubre de 1977. 9 p. y Anexos.
12. FOESLTER, H.; FASSBENDER, H.W. 1978. Oekopedologische Grundlagen der Bodennutzung in den Tropen und Subtropen (Bases ecopedológicas del uso del suelo en los trópicos y subtrópicos). Vorlesungsmanuskript. Universidad de Göttingen. Facultad Forestal. 153 p.
13. JENNY, H.; GESSEL, S.P.; BINGHAM, F.T. 1949. Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. *Soil Sci.* 68:419-432.
14. KONONOVA, M.M. 1967. Soil organic matter; its nature, its role in soil formation and in soil fertility. 2a. ed. Oxford. Pergamon Press. 544 p.
15. KUBIENA, W.L. 1948. Entwicklungslehre des Bodens. Viena. Springer-Verlag.
16. LAUDELOUT, H. 1960. Dynamics of tropical soils in relation to their fallowing techniques. Roma. FAO. 111 p.
17. LEAMY; PANTON. 1966. Soil survey manual for Malayan conditions. Kuala Lumpur. Min. Agric. Div. Agric. Bull. No. 119.
18. LUNA, Z.C. 1969. Aspectos genéticos de andosoles en Colombia. In Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Turrialba, Costa Rica, IICA. p. A.3.1-A.3.13.
19. LUTZ, H., CHANDLER, R.F. 1951. Forest soils. New York. Wiley & Sons. 5a. edition. 514 p.

20. MUNEVAR, F.; WOLLUM, A.G. 1976. Effects of the addition of phosphorus and inorganic nitrogen on carbon and nitrogen mineralization in Andepts from Colombia. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 41(3):540-545.
21. NYE, P.H.; GREELAND, D.J. 1960. The soil under shifting cultivation. England. Commonwealth Bureau of Soils. Tech. Comm. No. 51. 156 p.
22. PRITCHETT, W.L. 1979. Properties and management of forest soils-New York, Wiley & Sons. 500 p.
23. SALAS, G. DE LAS; FOELSTER, H. 1979. Bioelement loss on clearing a tropical rain forest. *Turrialba* 26(2):179-186.
24. _____. 1978. El ecosistema forestal Carare-Opón. Bogotá. CONIF. Serie Técnica No. 8. 71 p. más Anexos.
25. _____. 1979. Algunas consecuencias de la remoción del bosque sobre el suelo y el ciclo de nutrimentos en regiones tropicales. In *Simposium on impact of intensive harvesting on forest nutrient cycling*. Syracuse. State University of New York. College of environmental science and forestry. Agosto 1979. 421 p.
26. SANCHEZ, P.A. 1981. Suelos del trópico, características y manejo. Traducido por Edilberto Camacho. Serie de los libros, materiales educativos No. 48. San José, Costa Rica, IICA, 634 p.
27. SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHALEL, P. 1966. *Lehrbuch der bodenkunde*. Stuttgart. Enke Verlag. 473 p.
28. SOMBROEK, W.G. 1966. Amazon soils; a reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region. Wageningen. PUDOC. 292 p.
29. TERGAS, L.E.; POPENOE, H.L. 1971. Young secondary vegetation and soil interactions in Izabal, Guatemala. *Plant and Soil* 34:675-690.
30. ULRICH, B. 1977. Stoff haushalt von waldoekosystemen, eine arbeitsanleitung. Institut für Bodenkunde und Waldernährung, Vorlensungsmanuskript, p. 27 y 28; 39-43.

31. WILLIAMS, C.N.; JOSEPH, K.T. 1973. Climate, soil and crop production in the tropics Revised edition. Kuala Lumpur. Oxford University Press, p. 137-150.

CICLO DE ELEMENTOS QUIMICOS

Concepto

En el capítulo anterior se hizo referencia a la translocación de los elementos químicos con el agua. En este capítulo se hablará brevemente del ciclo de algunos de estos elementos en el ecosistema. Las trayectorias más o menos recurrentes de los elementos químicos entre los organismos y el medio ambiente, en ambos sentidos, se conocen como ciclos biogeoquímicos (Odum²⁶). La biogeoquímica es la ciencia que estudia el intercambio de los materiales químicos entre los componentes biótico y abiótico de la biosfera.

El tiempo y la tasa de renovación de los residuos vegetales se discutió anteriormente. En el ciclo de los elementos liberados, en la transformación de estos residuos, los flujos o tasas de transferencia, más que la concentración, son de suma importancia.

En los últimos diez años, el ciclo de bioelementos ha sido objeto de particular atención en las investigaciones ecológicas. El estudio unitario de los elementos se

ha relacionado con sus flujos energéticos y su evolución en el ecosistema, pues este enfoque aporta una visión del funcionamiento del mismo.

Los elementos esenciales para la vida de las plantas se denominan nutrimentos. Estos se dividen en macro y micronutrimentos. Su función como elementos nutritivos se discute en el capítulo 13. Existen otros elementos que son tóxicos, tanto para las plantas como para el hombre (p. e. vanadio, cobalto, plomo y estroncio 90) y que están ligados a los ciclos biogeoquímicos.

Odum²⁶ divide estos ciclos en dos grupos: los sedimentarios —como el del azufre y el fósforo— y los gaseosos, como el del nitrógeno.

Los ciclos de elementos químicos, tanto en ecosistemas terrestres como acuáticos, se hallan bien documentados gracias a proyectos como el IPB (Proyecto Internacional de Biología), MAB (Hombre y Biosfera) y otros auspiciados por instituciones nacionales e internacionales. Quien desee dedicarse a la investigación de ecosistemas (*ecosystem research*) debería enterarse a fondo de los experimentos de Hubbard Brook, Nueva Hampshire, EUA y del Proyecto Solling, Alemania Federal, reportado en más de 18 entregas en la serie *Ecosystem Research*. Para hablar del trópico americano, nuestro tema central en este libro, remito al estudiante interesado a los estudios realizados en: la Selva Amazónica del Brasil (Instituto Nacional de Pesquisa Agropecuaria —INPA—), la Amazonía Venezolana (Proyecto San Carlos de Río Negro, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas —IVIC—), Universidad de Georgia (EUA), Instituto Max Planck (Ploen, Alemania Federal) y otras instituciones; las investigaciones ecológicas realizadas en ecosistemas montanos de los Andes de Venezuela (Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Mérida y Universidad de Göttingen, Alemania Federal); el Proyecto Universidad de Florida (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza—CATIE—en Turrialba, Costa Rica); las investigaciones de selvas húmedas del Instituto de Investigaciones sobre Recursos Bióticos de México.

Nitrógeno

Uno de los elementos más importantes en las interacciones planta-suelo-microorganismos es el nitrógeno. La transferencia anual de nitrógeno, entre el suelo y la vegetación, excede en mucho otras transferencias globales de este elemento (Rosswall²⁷). La transfe-

rencia del nitrógeno entre la vegetación, el suelo y los microorganismos se representa en forma esquemática en la Fig. 21. La justificación de los datos consignados en la figura, dada por Rosswall²⁷, no necesita ser discutida aquí.

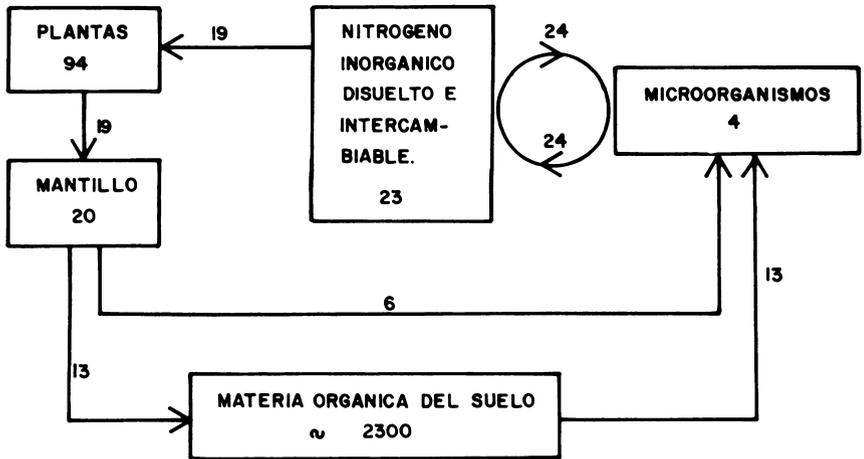


FIG. 20. Reservas (g/m²) y transferencias (g/m²/año) de nitrógeno dentro del sistema global planta-suelo.

FUENTE: Rosswall²⁷.

El ciclo de nitrógeno en el ecosistema forestal se ilustra en la Fig. 22, tomando como ejemplo un bosque montano de los Andes venezolanos. En este ejemplo, sólo el cuatro por ciento de las reservas del ecosistema se encuentra en la vegetación (1107 Kg/ha) y un alto porcentaje en el suelo mineral (27 ton/ha) y en la capa de mantillo (583 kg/ha). Esta particularidad es normal para suelos de ecosistemas montanos. El sitio investigado en San Eusebio está caracterizado por suelos con un alto contenido de materia orgánica (*Aquic Humitropept*, *Oxic Humitropept*: Hetsch¹⁶), de manera que el ingreso anual vía lluvia (9.9 kg/ha) es irrelevante para las reservas, como lo son las pérdidas (5.1 kg/ha y año). Las pérdidas son más importantes en ecosistemas de llanura, debido a la alta mineralización del N, por una parte, y a su volatilización mediante la práctica de la quema, por otra. La entrada de N con la lluvia, sus transferencias como escurrimiento foliar, escurrimiento de tallos y egreso del suelo, para varios ecosistemas forestales, están consignados en el Cuadro 16. Para comparar el ecosistema forestal natural de San Eusebio en los Andes, de Venezuela (Fig. 22), con plantaciones y sistemas agro-

forestales o mutiestrata*, se citan como ejemplo: a) una plantación de teca (*Tectona grandis*) de seis años en suelos aluviales de Venezuela; b) un rodal de la misma especie de 25 años en Nigeria, Africa, y un sistema agroforestal café-árbol de sombra poró (*Erythrina poeppigiana*) en Turrialba, Costa Rica. El Cuadro 22 resume el ciclo del N en estos tres sistemas.

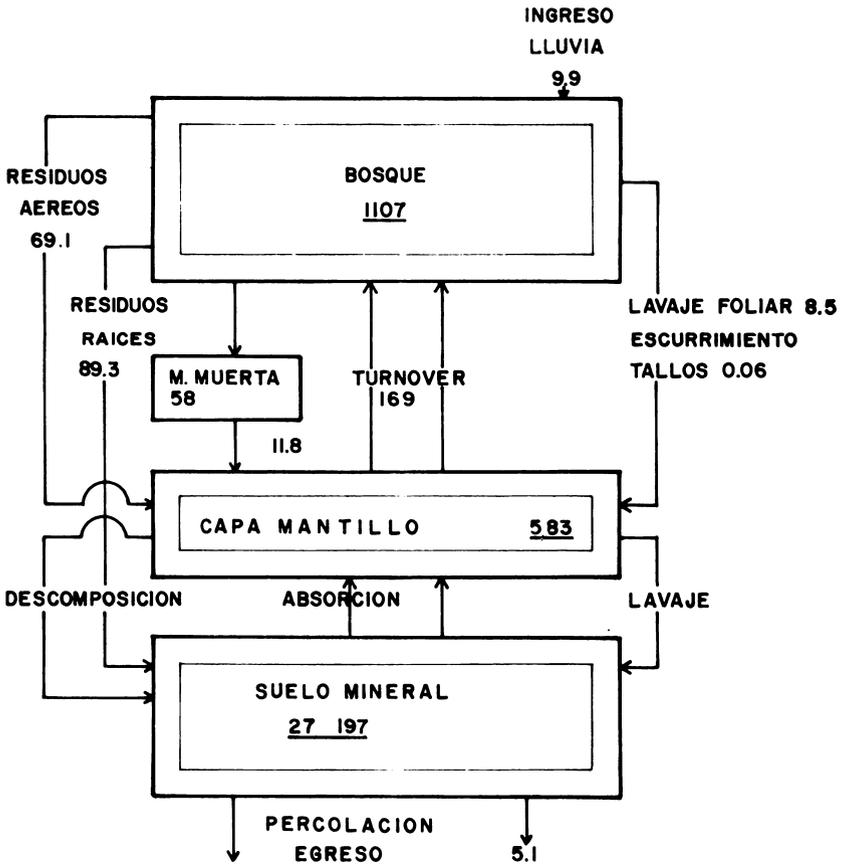


FIG. 21. Modelo del ciclo del nitrógeno en un ecosistema forestal montano (San Eusebio, Venezuela : 12.6°C; 2000 mm). Compartimiento: kg/ha; transferencias: kg/ha/año.

FUENTE: Fassbender y Grimm¹¹.

* Los sistemas agroforestales se tratan en el Cap. 12.

CUADRO 22: Reservas de nitrógeno (Kg/ha) y transferencias (Kg/ha/año) en dos ecosistemas forestales y uno agroforestal.

Componente	RESERVAS			Transferencias		
	Poró/café	Teca b/		Poró/café	Teca	
		Venezuela	Africa		Venezuela	Africa
Hojas	187/67	68	79	Podas mantillo	Lluvia	
Ramas	98/44	19	204	285	8.6	---
Tronco	54/71	125	915	Hojas + Ramas mantillo	Hojarasca mantillo	
Frutos	---64	---	---	169	---	49
Mantillo	136	159	890	Fertiliz.		
Suelo mineral a/	8500 (45)	500 (100)	4410 (30)	80		

a/ Cifra entre paréntesis corresponde a la profundidad en cm.

b/ Venezuela: 6 años; Africa: 25 años.

FUENTE: Fassbender⁹, Nwoboshi²⁵; Hase¹⁵, adaptado.

Los datos de este Cuadro y los de la Fig. 22 no arrojan, como es obvio, cifras comparables, por poseer estructuras vegetales, suelos y climas diferentes. Sin embargo, se puede concluir que las pérdidas por lavado importan poco, ya que las mayores reservas se encuentran en el suelo mineral. Las cantidades fijadas en las micelas de arcilla como NH_4^+ , no las conocemos, pero por lo que sabemos de los suelos de los sitios utilizados en los ejemplos (con excepción de Africa) por el autor, no deben ser altas. Los resultados mostrados, en los casos escogidos, son de utilidad para el investigador de ecosistemas, ya que le permiten: a) averiguar las entradas y salidas del elemento del ecosistema; b) conocer la tasa de renovación (*turnover*). En el caso de San Eusebio, esta tasa equivale a seis años y medio, considerada por Fassbender y Grimm¹¹ como alta; c) estimar en forma precisa las pérdidas y ganancias; d) hacer comparaciones con otros ecosistemas; e) conocer la "oferta" del ecosistema y, con ello, introducir cambios favorables (p.e., elevar el pH del suelo; sembrar leguminosas); f) inferir la velocidad del proceso de nitrificación para el caso del nitrógeno.

Conversiones del nitrógeno en el suelo

La materia orgánica y parcialmente el aire son las grandes fuentes del nitrógeno en la naturaleza. Los mecanismos biológicos y abiológicos gobiernan la nitrificación, la denitrificación y la fijación de este elemento. El primer proceso implica la transformación del nitró-

geno orgánico en nitratos, los cuales quedan a disponibilidad de los organismos autótrofos. Ninguno de los organismos vegetales o animales tiene la habilidad de fijar este elemento, excepto las leguminosas y algunas especies no leguminosas (p.e., *Alnus spp*), cuyos nódulos, alojados en sus raíces, sirven de albergue a bacterias nitrificantes. Los factores y mecanismos que regulan el ciclo del nitrógeno en la naturaleza, se muestran de una manera esquemática en la Fig. 23. El nitrógeno puede escasear, debido a varias razones, entre ellas: a) escasa actividad biológica; b) pérdida de materia orgánica por uso irracional del suelo o por erosión; c) condiciones climáticas extremas (zonas de escasa vegetación, temperaturas bajas, fuertes lluvias).

Como se advierte en la Fig. 23, el nitrógeno amoniacal, en la solución del suelo, está en equilibrio con el nitrógeno inorgánico intercambiable, unido a los minerales de arcilla y a los coloides orgánicos. La cantidad de nitrógeno inorgánico intercambiable y soluble, excede raras veces un 2% del nitrógeno total del suelo. La mayor parte del nitrógeno del suelo ocurre, sin embargo, en forma orgánica y debe ser mineralizado para su asimilación por las plantas.

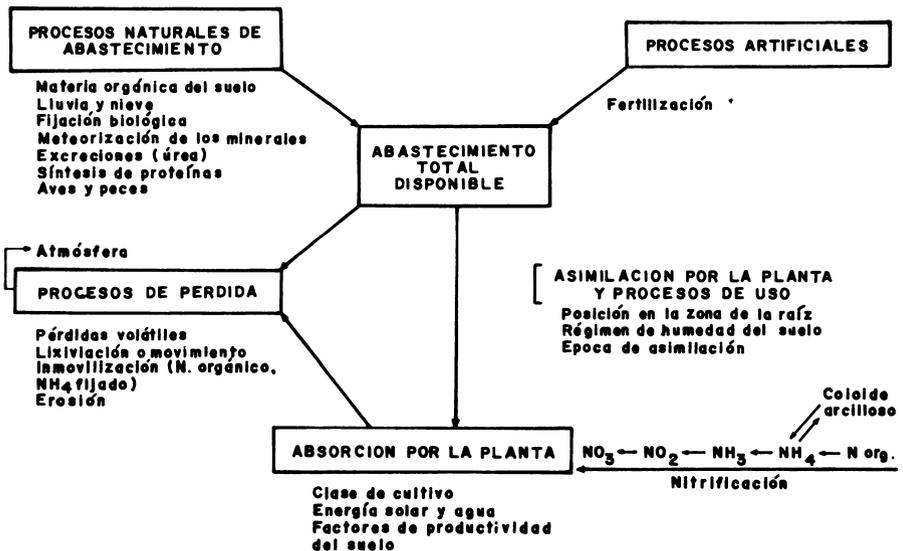


FIG. 22. Representación esquemática de los procesos de abastecimiento, pérdida y uso del nitrógeno del suelo (adaptado de Bartholomew, 1972). El nitrógeno del suelo. Proyecto internacional de evaluación y mejoramiento de la fertilidad del suelo. Bol. Tec. N°6. Univ. Carolina del Norte, EUA.

Mineralización e inmovilización

La mineralización del nitrógeno consiste en una serie de procesos, a través de los cuales los componentes orgánicos, ya sean de materia orgánica o residuos vegetales y animales recién incorporados al suelo, se transforman en compuestos inorgánicos nitrogenados, tales como NH_4^+ , NO_2^- y NO_3^- (Fassbender¹⁰). La mineralización consiste en tres etapas definidas: a) aminización, o sea, la transformación de proteínas en aminas; b) amonificación, es decir, la transformación de aminas en amonio (NH_4^+); y c) nitrificación, o el proceso de transformación de amonio en nitrato (NO_3^-), con una etapa intermedia de formación de nitritos (NO_2^-).

Las tasas de mineralización del nitrógeno dependen de varios factores, entre ellos: el tipo de arcilla, la acidez del suelo, la relación C-N, la capacidad de aireación del suelo, la humedad. Este último factor es tal vez el que más afecta las tasas de mineralización del nitrógeno en los trópicos, según estudios de varios autores. El efecto del secado y posterior rehumedecimiento del suelo en la mineralización del nitrógeno, ha sido ya reconocido por varios autores, encontrándose un aumento en la producción de nitrógeno mineral del suelo seco al aire, con respecto a la misma producción con suelo fresco. La mineralización del nitrógeno y carbono orgánicos es más rápida bajo condiciones alternas de humedecimiento y secamiento. Este efecto ha recibido el nombre de **efecto de Birch**^{4,5} quien encontró que el secamiento provoca una mineralización más rápida del carbono que del nitrógeno, reduciendo así su relación C-N. Sánchez²⁹ encontró, revisando a Birch^{4,5}, que la relación C-N crítica, sobre la cual se detiene la mineralización, es más alta bajo humedecimiento y secamiento alterno. Del Valle³⁴, al trabajar con suelos de origen volcánico en Colombia, encontró que el secado al aire y el posterior rehumedecimiento del suelo incrementó la mineralización de nitrógeno, considerablemente, con respecto al suelo fresco. A las dos semanas de incubación, este incremento llegó a ser de 15 veces y a las ocho semanas de 6 veces. Otro resultado encontrado por Birch^{4,5} fue que, en un residuo de cosecha que contenía 1.5% de nitrógeno, se mineralizó bajo humedecimiento y secado alternos, pero se inmovilizó bajo humedad constante. Sánchez²⁹ atribuye este fenómeno a una población microbiana más activa después del secamiento y humedecimiento del suelo, o a una mayor accesibilidad del humus a los microorganismos, por la contracción y dilatación de los minerales de arcilla o de los delgados revestimientos de óxido de hierro y aluminio. Fassbender^{9,10} comenta que, en muestreos quincenales reali-

zados por Greenland en Africa, respecto a la nitrificación, se observó claramente que la activación de este proceso se produjo al iniciarse las dos épocas lluviosas del año en Ghana (Africa Tropical), debido probablemente al estado de baja humedad de los suelos, inmediatamente antes de iniciarse el período lluvioso.

Las reacciones y procesos químicos que expresan los fenómenos de amonificación y nitrificación del suelo son parte de los textos de química de suelos, por lo que se sugiere al lector interesado revisar estas publicaciones (ver, por ejemplo, Fassbender⁹, 1⁰).

Dentro de las conversiones del nitrógeno en el suelo, otro proceso importante es su fijación, que abarca dos formas: simbiótica y no simbiótica. La fijación simbiótica del nitrógeno contribuye, en gran proporción, al crecimiento de las plantas en ámbitos tropicales. Sin embargo, la mayoría de esta ganancia de nitrógeno proviene de las regiones forestales, las áreas de sabana, los pastizales y, sólo en una menor proporción, proviene de las cosechas agrícolas. La literatura disponible cubre un amplio espectro de tópicos relacionados con la fijación simbiótica del nitrógeno (ver, por ejemplo, Graham y Harris¹²). Estos tópicos incluyen: plantas hospederas tropicales, microorganismos simbióticos, bioquímica de fijación del nitrógeno, procesos de inoculación y evaluaciones de la nodulación, metodologías para la evaluación de los procesos de fijación, influencia de leguminosas y otras plantas hospederas sobre plantas asociadas, factores climáticos y edáficos que influyen en el crecimiento de la planta hospedera y en la fijación de nitrógeno, tecnología para la producción de inoculantes, ensayos de inoculación, factores vegetales que afectan la fijación de N_2 , factores ambientales que afectan la fijación simbiótica de N_2 y fijación de N_2 en árboles. Este último aspecto interesa particularmente al forestal, debido a que recientemente se ha descubierto una cantidad de usos para especies arbóreas leguminosas y no leguminosas, fijadoras de nitrógeno en los trópicos, las cuales pueden remediar en parte las necesidades energéticas de leña y forraje en sitios deforestados o en climas extremos (ver Cap. 12). Dommergues⁷ comenta que el potencial de las especies arbóreas leguminosas para fijar N_2 varía grandemente. Así, dentro del género *Acacia*, la especie *Acacia mearnsii* es muy activa en la fijación de N_2 , mientras que la especie *albida* no lo es. Puesto que los árboles son especies perennes, esta evaluación debería hacerse no solamente en el estado inicial de plántulas, que pueden extenderse de uno a cuatro años en viveros, sino también cuando existen especies trasplantadas en el campo. El Cuadro 23 da una estimación general del potencial de fijación de

N_2 de cuatro especies de árboles que crecen en toda el área húmeda y árida de los trópicos. En este cuadro se destacan: *Leucaena leucocephala*, una planta que puede ser usada para reforestación, forraje animal, leña o cobertura del suelo con sus hojas *mulch* (ver, por ejemplo, National Academy of Sciences^{22,23,24}). Esta especie parece tener un alto potencial de fijación de N_2 cuando crece en condiciones favorables. *Acacia mearnsii* ha sido introducida en muchas partes del mundo (por ejemplo, en el sudeste y el este de Africa y Madagascar) como una fuente de tanino, madera y leña; es también una activa fijadora de N_2 y tiene la ventaja de adaptarse a un amplio ámbito de condiciones ambientales. Dommergues⁷ comenta que la especie *Casuarina*, cuando es nodulada por su endophito *Frankia spp*, en condiciones favorables, puede fijar entre 58 y 218 kg de N_2 /ha y año. Existe otra manera para evaluar el potencial de fijación de N_2 de las especies arbóreas, que consiste en estimar simultáneamente el peso total de los nódulos de un árbol y la reducción específica del acetileno de los nódulos. Esta técnica pertenece a la literatura especializada, la cual se sugiere al lector interesado.

CUADRO 23: Estimativos de campo de la capacidad de fijación del N_2 por algunas especies arbóreas en el trópico.

Especies	Ambito geográfico	N_2 fijado Kg/ha/año	Autor
<i>Leucaena leucocephala</i>	trópicos húmedos	500 a/	NAS, 1977
<i>Acacia mearnsii</i>	montañas tropicales	200	Orchard y Darby, 1956
<i>Casuarina equisetifolia</i>	zonas áridas	58	Dommergues, Agrochimica, 1963
<i>Casuarina littoralis</i>	trópicos húmedos	218	Silvester, 1977

a/ Datos de estudios de la Universidad de Hawaii y de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Queensland, Australia.

FUENTE: Dommergues⁷.

Para cerrar este acápite sobre inmovilización del nitrógeno, haremos algunas generalizaciones válidas para la fijación nitrogenada por medios no simbióticos (Bartholomew²; Graham y Harris¹²; Bermúdez de Castro³):

1) La capacidad de fijación del nitrógeno está muy extendida entre los organismos libres. Esta ocurre entre organismos autotróficos y heterotróficos. 2) Los organismos con capacidad fijadora de nitró-

geno están distribuidos sobre grandes extensiones, donde es posible el crecimiento vegetal. 3) Los mecanismos biológicos y los procesos de control de fijación nitrogenada no simbiótica son muy similares a los procesos de fijación simbiótica. 4) Los procesos de fijación están íntimamente relacionados y controlados por la fisiología del organismo respectivo y dependen de la técnica seguida en su evaluación, de la edad de las plantas, del estado fisiológico de los nódulos y de diversos factores estacionales y ambientales, incluyendo la concentración de nitrógeno en el suelo. 5) los estimativos de la fijación no simbiótica en suelos promedio oscilan entre uno y dos kilogramos por hectárea y años hasta 20 y 40. Este resultado, sin embargo, difiere de los datos estimados por otros investigadores del trópico. Así, de las Salas y Foelster²⁸ estimaron tasas de fijación del nitrógeno no simbiótico entre 100 y 150 kg/ha y año, para rastrojos secundarios en ecosistemas de llanura en Colombia. Mientras que Greenland y Nye¹³ sugieren tasas de fijación similares, Jaiyebo y Moore¹⁷ encontraron niveles de fijación de nitrógeno del orden de 650 kg/ha y año, lo que parece un nivel muy alto. 6) Bajo condiciones idealizadas (en donde los factores ambientales son óptimos y hay una abundante energía, luz o carbohidratos), se han registrado altas tasas de fijación. Estas han sido demostradas, tanto en el laboratorio como en condiciones de campo. 7) La importancia de este proceso (fijación nitrogenada no simbiótica) en la producción agrícola resulta, en la práctica, cuestionable. En sistemas de baja productividad, donde el nitrógeno del suelo es persistentemente magro y una cantidad razonable de energía de carbohidratos regresa al suelo, la magnitud de la fijación de nitrógeno por año es del orden de cuatro a ocho kilogramos por hectárea. En lugares donde crece arroz, por ejemplo, en suelos inundados, las algas pueden hacer una contribución similar o mayor a los incrementos de nitrógeno adicionados al suelo.

Pérdidas: Existen, para el trópico, relativamente pocos datos para las pérdidas de nitrógeno en los ecosistemas forestales y de sabana. Los mecanismos que conducen a las pérdidas de nitrógeno pueden agruparse como sigue: a) lixiviación; b) volatilización del amonio; c) erosión y d) desnitrificación.

Las pérdidas de nitratos por lixiviación o lavado constituyen uno de los principales canales de pérdidas de nitrógeno en los suelos. Allison (citado por Guerrero¹⁴), indica que el lavado de nitratos está altamente correlacionado con el movimiento del agua en el suelo y que la cantidad N perdida depende, entre otros, de los factores siguientes: a) forma y cantidad de nitrógeno presente o añadido; b)

cantidad y duración de las lluvias; c) velocidad de infiltración y percolación, la que a su vez depende de la composición, textura y estructura del suelo, la profundidad del perfil y la cobertura vegetal; d) capacidad de retención de agua del suelo y contenido de humedad en el momento en que se produce la lluvia; e) presencia o ausencia de cultivo y tipo del mismo; f) intensidad de la evapotranspiración; g) tasa de remoción de nitrógeno por parte del cultivo; h) grado de movimiento de los nitratos hacia arriba durante los períodos de sequía.

La conclusión general es que una cantidad apreciable de nitrógeno (hasta un 50% del nitrógeno aplicado) se pierde en suelos tropicales cultivados, debido principalmente al lavado.

La volatilización del amonio se denomina también, por algunos autores, como denitrificación no biológica. Esta es el resultado de reacciones químicas entre los diferentes componentes nitrogenados inorgánicos ya presentes en el suelo y los aplicados con fertilizantes. La volatilización del amonio tiene cada día más importancia, debido a: 1) el marcado incremento en las dosis aplicadas de nitrógeno en la fertilización; 2) el uso creciente de amonio anhidro; 3) la preferencia de la úrea como fuente de fertilización (Fassbender^{9,10}). Acquaye y Cuninghamn (citados por Fassbender^{9,10} y Guerrero¹⁴), investigaron la acción de diferentes factores sobre la volatilización del amonio. Concluyeron que:

la volatilización se incrementó cuando el pH aumentó. Debajo de pH6, la pérdida fue menor del uno por ciento, pero se incrementó gradualmente entre pH6 y 7, y muy rápidamente en valores superiores a pH7.5;

la temperatura incrementó la volatilización, tanto para el caso de la úrea como para el sulfato de amonio, en un período de siete días. Las pérdidas de amonio se cuadruplicaron cuando la temperatura se elevó de 20°C a 35°C. Los autores concluyen que estos resultados sugieren que la volatilización puede ser excesiva en los trópicos, donde las temperaturas diarias máximas del suelo artificial pueden llegar a valores superiores a 30°C;

la volatilización del amonio fue pequeña en bajos contenidos de humedad, pero aumentó con el ascenso de ésta hasta un 25%. Desde este valor, las pérdidas decrecieron gradualmente a mayores contenidos de humedad. Es decir, la volatilización máxima se produjo a 25% de humedad;

las pérdidas disminuyeron considerablemente cuando aumentó la capacidad de intercambio catiónico del suelo; y cuando aumentó la dosis de aplicación de nitrógeno.

De los varios trabajos de investigación en los trópicos, se puede concluir que se presentan grandes pérdidas de amonio, especialmente a partir de la úrea, cuando ésta se aplica en grandes cantidades a suelos tropicales livianos y su aplicación es superficial. Esta pérdida se puede reducir hasta en un 50%, aplicándola a unos 10 cm de profundidad.

La denitrificación se conoce comúnmente como el proceso de reducción biológica de nitrato o nitrito a nitrógeno gaseoso. Es llevada a cabo por microorganismos heterotróficos, muchos de ellos de exigencia en oxígeno como receptor del hidrógeno, pero que pueden actuar también utilizando nitratos y nitrógeno nítrico como sustitutos del oxígeno. Según Alexander (citado por Guerrero¹⁴), la verdadera denitrificación sólo es realizada por un número limitado de bacterias. Las especies más activas pertenecen a los géneros *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Bacillus* y *Micrococcus*, aunque *Thiobacillus denitrificans* y ocasionalmente *Chromobacterium* y *Mycoplana* pueden catalizar la reducción.

La velocidad de la denitrificación depende de las condiciones edafológicas. Se ha comprobado que ocurre cuando el O₂ es limitativo y bajo condiciones de alta humedad en el suelo. Así Greenland (citado por Guerrero¹⁴) opina que las mayores pérdidas de nitrógeno nítrico se presentan en suelos tropicales, bajo condiciones de saturación de humedad. Sin embargo, afirma que tales condiciones en el campo sólo pueden reproducirse después de un fuerte aguacero y no pueden sostenerse por más de un día en los suelos agrícolas. Greenland también afirma que los suelos tropicales cultivados y forestales pueden presentar una considerable denitrificación a pH neutros o alcalinos. En suelos con tendencia a una rápida saturación, es importante medir las pérdidas por denitrificación (éstas alcanzaron el 97% en suelos de Africa Central, según datos de Greenland). Estas pérdidas son importantes, si se tiene en cuenta el alto costo de los fertilizantes.

Fósforo

El fósforo es un elemento que usualmente limita el crecimiento de la planta, debido a que la concentración del fósforo accesible a

ésta (ión PO_4^{-3}) es muy bajo en la mayoría de los casos. Dicho elemento existe predominantemente en formas insolubles, como apatita. El fósforo inorgánico soluble, liberado por meteorización, es en gran parte inmovilizado rápidamente en el suelo por iones de aluminio, hierro y algunas veces por calcio.

En los cuerpos de agua, los iones fosfato no son tan fácilmente inmovilizados, debido a que las concentraciones de hierro, aluminio y, a menudo, calcio, son mucho más bajas en el agua que en el suelo. El fósforo (PO_4^{-3}), proveniente de los desechos industriales y humanos y de los detergentes, es descargado directamente a las aguas. Allí es utilizado rápidamente por plantas y fitoplancton, los cuales se multiplican rápidamente (eutroficación). Este fenómeno es causa de preocupación en los embalses hidroeléctricos, ya que origina inmensos daños en las turbinas, no sólo por su obstrucción sino por la corrosión ocasionada por ácidos (sulfhídrico) y otras sustancias que se forman en un medio acuático falto de oxígeno.

Ciclo del fósforo en el ecosistema forestal

Las investigaciones sobre el ciclo del fósforo en los ecosistemas naturales son escasas. En los capítulos 6, 7 y 8 se presentaron datos (Cuadros 14, 15, 16 y 18) sobre la distribución de los nutrimentos en la vegetación, en el mantillo, en las raíces y en el suelo de algunos ecosistemas forestales. Para el caso del fósforo las reservas totales fueron:

Sitio	Reserva (Kg P/ha)
Puerto Rico	297
San Eusebio, Venezuela	604
San Carlos, Venezuela	140
Magdalena, Colombia	299
Manaos, Brasil	191

El Cuadro 14 da cuenta de un alto porcentaje de estas reservas para Puerto Rico (74^o/o), Magdalena (85^o/o), San Eusebio (84^o/o) y Manaos (65^o/o), en suelo mineral, lo cual indica la estabilidad de estos ecosistemas respecto de P. No sucede lo mismo con otros, los cuales inmovilizan grandes cantidades de fósforo en la vegetación (Kade, Ghana: 85^o/o; Santa Fe, Panamá: 79^o/o; Nueva Guinea: 79^o/o, Fassbender^{1 0}).

Esto significa que el capital de fósforo depende de la destrucción o conservación de la vegetación.

Las grandes reservas en el suelo mineral de un ecosistema montaño en los Andes venezolanos (6400 kg/ha) y de una plantación de *Pinus patula* de 30 años en Tanzania, Africa (1830 Kg/ha), así como las pequeñas transferencias de fósforo en el ecosistema venezolano (residuos: 4 - 5.4 Kg/ha/año) sugieren su estabilidad en el suelo y escasa movilidad (Fassbender y Grimm¹¹; Lundgren¹⁹). El ecosistema andino, por otra parte, registra una tasa de renovación, para el fósforo, de seis años, resultante de dividir su reserva (66 Kg/ha) por su ciclo anual (10.37 kg/ha) (Fassbender y Grimm¹¹). Estos autores registraron también la tasa de renovación del P para un bosque pluvial en Puerto Rico (42 años) y un ecosistema forestal en Kade, Africa (9.6 años).

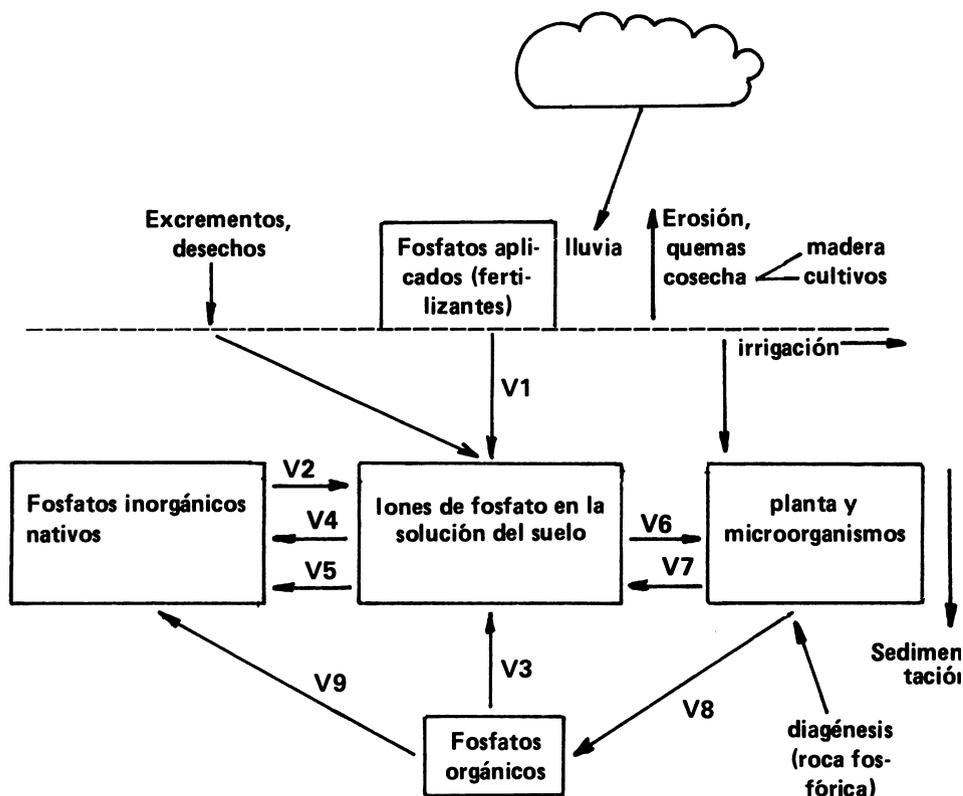
La circulación del fósforo y de otros elementos (inmovilización, remoción y demanda) en ecosistemas forestales (plantaciones) se trata en detalle en el Cap. 13.

Ciclo del fósforo en el suelo

La transformación de los fosfatos en el suelo está esquematizada en la Fig. 24. Fassbender^{9,10} describe el ciclo de los fosfatos de la manera siguiente.

Los procesos que conducen a la formación de iones fosfato en la solución del suelo, los cuales absorbe la planta (V6), corresponden a la disolución de los fertilizantes aplicados y de los fosfatos inorgánicos nativos y a la mineralización directa de los fosfatos orgánicos; parte de los iones H_2PO_4 utilizados por la planta, son devueltos nuevamente (V7). Los restos de las plantas se incorporan al suelo como biomasa, después de la cosecha, y aportan su cuota de fosfatos orgánicos (V8) para ser mineralizados. Los fertilizantes en el suelo se disuelven y realizan interacciones, a través de procesos de adsorción que tienen lugar en la superficie de las partículas coloidales (V4) y de la precipitación, en forma de fosfatos menos solubles (V5). Una proporción del fósforo aplicado como fertilizante es fijada* en el suelo.

* **Fijación** del P es el proceso consistente en la transformación de fosfatos monocálcicos solubles (superfosfatos) a fosfatos menos solubles de calcio, aluminio o hierro (Sánchez²⁹).



- V1 Disolución de fertilizantes
- V2 Disolución de fosfatos inorgánicos
- V3 Mineralización de fosfatos orgánicos
- V4 Adsorción de H_2PO_4^-
- V5 Precipitación de fosfatos de Ca, Al, Fe
- V6 Absorción de P por las plantas
- V7 Expulsión de P de las plantas
- V8 Deposición de restos vegetales
- V9 Interacciones entre los fosfatos orgánicos e inorgánicos

FIG. 23. Ciclo del fósforo en los suelos.

FUENTE: Fassbender¹⁰; modificado. Reproducido con permiso del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.

Finalmente, existe una interacción entre los fosfatos orgánicos e inorgánicos. Habría que agregar que existen entradas adicionales al suelo, aunque difíciles de cuantificar, por concepto de excrementos, lluvia, diagénesis de rocas fosfóricas y corrientes de agua que, en una u otra forma, ingresan al suelo (p.e., suelos bajo irrigación). Por otra parte, se producen pérdidas de fósforo por cualquiera de las siguientes causas: erosión, quemas y cosecha de madera o cultivos.

Dentro del ciclo del fósforo, un proceso muy importante es la **mineralización** de P orgánico, que obedece al mismo esquema presentado para el nitrógeno orgánico, es decir, la formación de compuestos menos complejos (ácidos nucleicos, proteínas), a partir de sustancias polimerizadas (nucleoproteínas), que liberan ácido fosfórico. La actividad biológica, al igual que en la mineralización del nitrógeno, es muy importante.

La mineralización del fósforo orgánico es a menudo difícil de cuantificar, debido a que los iones $H_2PO_4^-$ pueden fijarse en compuestos inorgánicos. Acquaye¹ (citado por Sánchez²⁹) sugiere que el fósforo orgánico puede liberar de 2 a 27 ppm de P al suelo y que las aplicaciones de nitrógeno y fósforo aumentan la mineralización del fósforo orgánico. La conservación de la materia orgánica es parte del manejo del fósforo orgánico; y debe jugar un papel preponderante en sitios donde esta fracción es dominante.

La adsorción y la precipitación de fosfatos, así como la transformación de compuestos fosfatados utilizados como fertilizantes, pertenece al campo de la química de suelos, la cual cuenta con una extensa documentación, entre libros y publicaciones periódicas. Las necesidades de fósforo de los cultivos tropicales es tratada exhaustivamente por Sánchez²⁹. El fósforo, en la fertilización forestal, se trata en el Cap. 13.

Potasio

El potasio se halla muy extendido entre los minerales que constituyen la corteza terrestre, que lo contiene casi en un tres por ciento. Estos minerales se alteran en el curso de la formación de los suelos, encontrándose el potasio parcialmente liberado. Las micas (moscovita, biotita) y los feldspatos (ortosa, sanidita, microclina) desempeñan a este respecto un doble papel, particularmente importante:

- a) por su fuerte contenido en K, que puede alcanzar 7-8%;
- b) por su evolución, que conduce a la formación de arcillas.

Las arcillas son coloides electronegativos que retienen en su superficie, por absorción de intercambio, cationes intercambiables. El conjunto de sus cargas electronegativas representa su capacidad de intercambio de cationes; estos cationes intercambiables son principalmente el calcio, el magnesio, el potasio, el sodio y los iones H^+ .

Los coloides húmicos, que provienen de la descomposición de los residuos vegetales, poseen propiedades del mismo orden, es decir, son igualmente electronegativos y poseen una capacidad de intercambio catiónico mucho más alta que la de los coloides arcillosos.

La distribución del contenido de potasio en los suelos, a escala mundial, depende de la presencia y la meteorización de feldespatos y micas en los materiales parentales (Fassbender^{9,10}).

Los suelos Andosoles de América se han formado en su mayoría de cenizas volcánicas. En Colombia, un 70% de los suelos de la zona cafetera tienen influencia de cenizas volcánicas.

Ciclo del potasio en el ecosistema forestal

Las investigaciones, en los ecosistemas naturales de bosque en el trópico, sobre los ciclos de elementos nutritivos, se han incrementado mucho en los últimos diez años, como se mencionó al principio de este capítulo. Para el potasio, por ser un elemento muy móvil en el ecosistema, son muy importantes sus adiciones por la lluvia, su liberación en los restos vegetales, su translocación al suelo mineral y posterior transformación y, sobre todo, su tasa de renovación (*turnover*).

Además, interesan las pérdidas como ión disuelto en las aguas de escorrentía y percolación y en los sedimentos arrastrados por la erosión.

Para ilustrar el ciclo del potasio en el ecosistema forestal, se ha tomado de nuevo el ejemplo del bosque montano de San Eusebio, en los Andes de Venezuela (Fig. 25). Aquí, el potasio tiene un comportamiento diferente al de los demás elementos. Se aprecia que la reserva es mayor en la vegetación (1469 Kg/ha) que en el suelo mineral

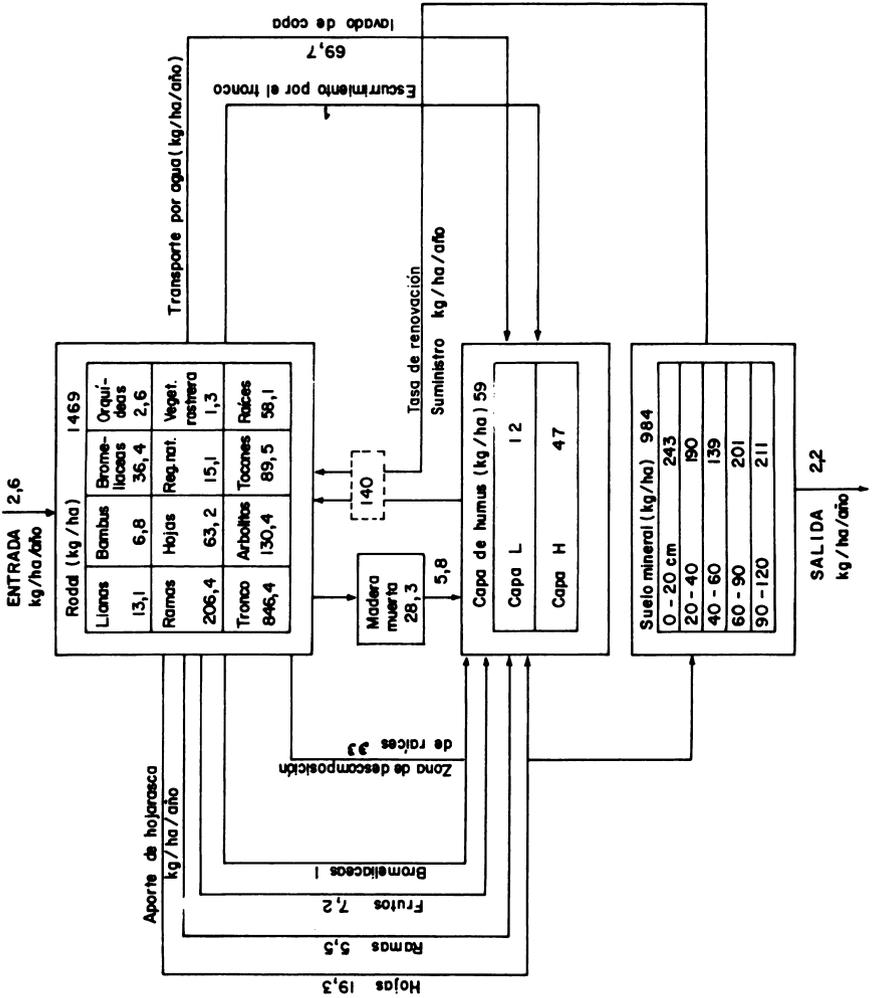


FIG. 24. Modelo del ciclo del potasio en un rodal de *P. rospigliosii*, San Eusebio, Venezuela. FUENTE: Steinhardt³¹.

(984 Kg/ha), aun a una profundidad de 120 cm. La duración del ciclo interno —*turnover-time*— se estimó en 10.5 años y se obtuvo dividiendo la reserva en la vegetación (1469 Kg/ha) por la tasa de renovación —*turnover*— (140 Kg/ha/año). En la translocación, el lavado de copa juega aquí —en contraste con otros elementos— un papel importante. Nótese que esta translocación (69.7 Kg/ha/año) es mayor que el aporte de hojarasca y la descomposición de raíces sumadas (66 Kg/ha/año). Por otra parte, debe destacarse que la entrada con la lluvia (2.6 kg/ha/año) y la salida del ecosistema (2,2 kg/ha/año) no alteran el *status* nutricional ni el ciclo del potasio para este ecosistema en particular, lo cual permite inferir que el sistema se encuentra en un **estado estacionario**. Por último, la relación *turnover*/salida de 64, comprueba la gran movilidad del potasio en su ciclo interno.

La tasa de erosión de este elemento no fue medida en el ejemplo que nos ocupa, por cuanto el sitio escogido para la investigación forma parte de una reserva forestal de la Universidad de los Andes de Mérida y, como tal, está bien conservada. Sin embargo, Hetsch¹⁶, al investigar los suelos de esta región, advierte sobre el serio peligro de erosión existente en sitios de fuertes pendientes, donde un sedimento arcilloso en la superficie hace prever una fuerte remoción del humus y del suelo superficial, por mal uso de la tierra.

El ciclo descrito del potasio es sólo ilustrativo para el caso específico tomado como ejemplo. Este ciclo puede variar en otros ecosistemas, dependiendo del clima, del tipo de vegetación y de suelo y el grado de disturbio. Así, por ejemplo, McColl²⁰ registró pérdidas de K de 52 Kg/ha/año en el agua de percolación, correspondientes a casi dos veces la entrada por la lluvia (18 Kg/ha/año) en el bosque lluvioso tropical de la Selva (3800 mm), en Costa Rica. Sus resultados, sin embargo, se basan en unas cuantas observaciones (análisis de la concentración de elementos químicos en la lluvia durante 14 días) y no son comparables con el estudio de San Eusebio.

Ciclo del potasio en el suelo

Los procesos dinámicos de liberación, retención, ganancias y pérdidas del potasio se presentan en forma esquemática en la Fig. 26.

El ciclo ilustra que la fuente primaria del K en el suelo son los minerales primarios y los secundarios, resultantes de su alteración. En algunos casos, la materia orgánica puede contribuir como fuente de K.

El potasio, en la solución del suelo, se encuentra en forma accesible para la planta.

El K intercambiable, ligado al complejo arcilloso-húmico, se encuentra en equilibrio con la solución del suelo, por lo que, al ser absorbido por la planta o lavado, se produce su reposición en la solución del suelo a partir de K cambiante (Fassbender^{9,10}). Este fenómeno es muy importante, ya que se cuenta con una reserva de K, la cual abastece a la planta cada vez que es menester. Por otra parte, este elemento se protege del lavado por medio del proceso de adsorción o fijación.

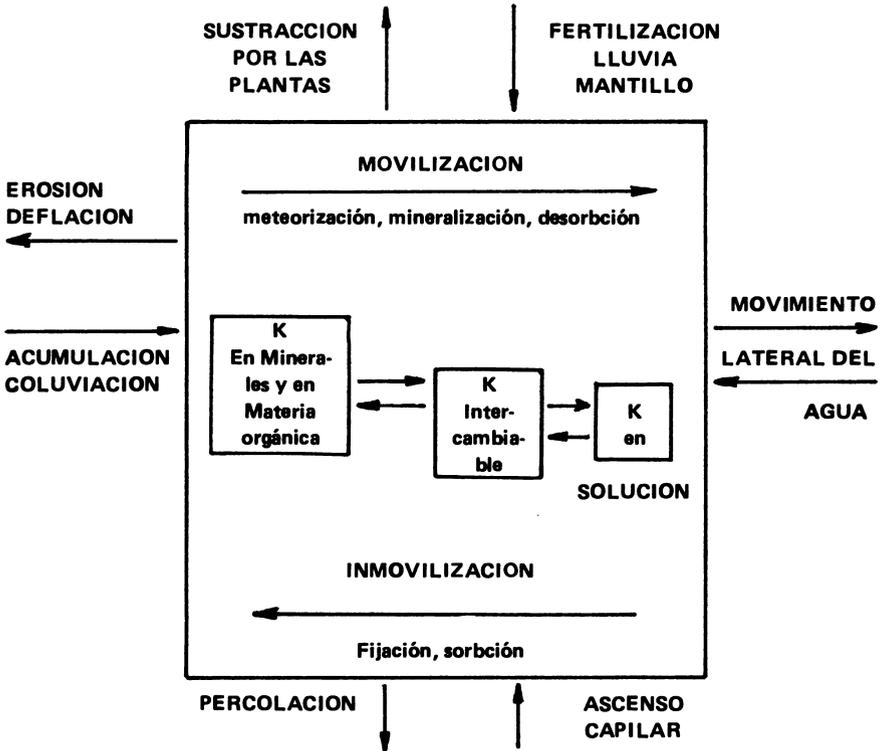


FIG. 25. Esquema del ciclo del potasio en el suelo (según Schroeder³⁰). Original no consultado.

FUENTE: Mejía²¹.

La **fijación** consiste, básicamente, en que los iones K de la solución del suelo ocupan el espacio interlamilar de los minerales de arcilla y se "resguardan" allí, dejando de ser intercambiables. Mejía²¹ comenta que el proceso viene acompañado por el colapso del espacio interlamilar en torno al catión y la consiguiente regeneración de la estructura original del mineral micáceo. La fijación constituye una reserva que puede ser aprovechada nuevamente cuando escasea el K en la solución del suelo. Ocurre preferentemente en presencia de minerales del tipo illita, vermiculita y montmorillonita en menor grado. Algunos minerales amorfos, como la alófana, tienen gran afinidad por el potasio (Sticher³², citado por Mejía²¹). Sin embargo, esta retención requiere un medio alcalino (Luna y Suárez¹⁸). Estos autores comentan que estudios realizados en el Japón, demostraron que el humus y la alófana adsorben débilmente el K y que su nivel disminuyó al aumentar el contenido de humus, de alófana y la acidez del suelo. Los mismos estudios mostraron que el grado de retención de iones K^+ y NH_4^+ variaron con la siguiente secuencia:

Suelo montmorillonítico > caolinítico > alofánico > alofánico - húmico.

Las **pérdidas** de K en el suelo se suceden por lavado, por erosión de la capa superficial del suelo, por escorrentía y percolación profunda.

Las pérdidas de K^+ y NH_4^+ por lixiviación y desplazamiento por otros cationes (H^+ y Ca^{++}) mostraron la siguiente secuencia en los estudios japoneses reportados por Luna y Suárez¹⁸:

Suelo alofánico-húmico > alofánico > caolinítico > montmorillonítico.

Estos mismos autores comentan que, en suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia, pobres en Ca y Mg intercambiables, las aplicaciones masivas de K causan deficiencias de estos elementos en café, cítricos, cacao y otros cultivos, especialmente cuando los suelos alofánicos son muy ricos en humus. Las pérdidas de potasio y otros elementos han sido investigadas sistemáticamente por el Centro de Investigaciones de Café, Chinchiná, Colombia. Las investigaciones pioneras de Suárez de Castro y Rodríguez Grandas³³ aún tienen vigencia, por cuanto existe muy poca información al respecto. Estos autores registraron pérdidas de K en el agua de percolación, en parcelas experimentales, de 235 Kg/ha/año, en suelo sin cobertura vege-

tal, contra 101 kg/ha/año con cobertura viva. Estos datos se citan apenas como un ejemplo, con el propósito de destacar la importancia de las pérdidas de los elementos nutritivos en suelos valiosos para la economía agrícola, como son los suelos cafeteros colombianos. Obviamente, deben existir otros estudios, que escapan al conocimiento del autor y cuyo examen corresponde más al campo de la conservación de suelos.

Azufre

El azufre, junto con el carbono y el nitrógeno, están sujetos a grandes transformaciones biológicas y a fuertes volatilizaciones, por el efecto de las quemas. Ewel *et al*⁸ comprobaron que, contrariamente a lo esperado, un 43% del C, 69% de N y 48% de S estaban contenidos en los tres centímetros superiores del suelo, en un ecosistema forestal tropical en Turrialba, Costa Rica. Eso significa que la mitad del azufre estaba representado en la biomasa aérea. Sánchez²⁹ comenta que los suelos tropicales altos en materia orgánica y alófana, contienen altas cantidades de azufre total; y que los suelos deficientes en azufre, presentan una o más de las siguientes propiedades: a) ostentan altos contenidos en alófana u óxidos; b) son bajos en materia orgánica; c) son, a menudo, arenosos.

Muchos suelos tropicales expuestos a las quemas, frecuentemente presentan deficiencias de S, debido a que una alta proporción de este elemento (60-75%) se volatiliza por el fuego. Sin embargo, el S contenido en el suelo mineral es relativamente inmune a la volatilización durante el fuego.

La distribución de C, N y S en el bosque, en la roza (monte tumbado) y después de una quema experimental se muestra en el Cuadro 24.

CUADRO 24: Distribución de C, N y S en el bosque, la roza (material de 11 semanas) y después de una quema experimental en un ecosistema húmedo tropical (2800 mm. 600 m.s.n.m; Turrialba, Costa Rica).

Tratamiento a/	C kg/m ²	N g/m ²	S g/m ²
Bosque	5.3	219	27
Suelo %	42	66	45
Roza	4.0	214	23
Suelo %	56	76	54
Quema	2.4	165	4
Suelo %	76	86	61

a/ valores para C, N y S incluyen las raíces y el suelo hasta una profundidad de 3 cm.
FUENTE: Ewel⁸ *et al*, adaptado.

Los datos experimentales del Cuadro 24 son elocuentes: los tres elementos, sujetos a fuertes pérdidas por volatilización, mantienen altos porcentajes en el suelo superior. En el caso del azufre, de un contenido de 40 kg/ha, tras la quema, permanece un 61% en el suelo; el resto se reparte entre las raíces, la madera y la ceniza remanente de la quema. Este azufre debe ser mineralizado para su asimilación por la planta.

La mayor parte del contenido de azufre en los suelos tropicales se encuentra en forma orgánica. Sánchez²⁹ reporta una relación C:N:S, para suelos de Nigeria, de 126:10:1, mientras Fassbender^{9,10} cita ejemplos de Australia, Nueva Zelandia y EUA, en los cuales esta relación varía de 113:10:1 a 152:10:1.

El proceso de mineralización del azufre orgánico es similar al del nitrógeno orgánico y existe una gran similitud entre ambos ciclos. La mineralización transforma el azufre en SH_2 y éste, al ser oxidado por microorganismos (bacterias y hongos), es llevado a la forma de ión SO_4^{2-} , el cual es utilizado directamente por las plantas, inmovilizado por los mismos microorganismos, lixiviado como sales (p.e. CaSO_4) o volatilizado como SO_2 . Los factores que favorecen o desfavorecen el proceso de mineralización fueron tratados, para el caso del nitrógeno, y también en el Cap. 8 (materia orgánica).

Además de la mineralización del S orgánico, los iones SO_4^{2-} pueden incorporarse al suelo, a través de la lluvia, agua de riego, fertilizantes, plaguicidas, gases de erupciones volcánicas y contaminantes industriales.

Con el uso creciente de los fertilizantes en la agricultura, las deficiencias de azufre dejaron de ser un problema.

Los suelos altos en óxidos de hierro y de aluminio, o en alófana, presentan condiciones favorables para la absorción de iones sulfato, por su capacidad de intercambio aniónico (Sánchez²⁹).

Los mecanismos de adsorción del azufre en el suelo obedecen, por un lado, al intercambio de iones sulfato (SO_4^{2-}) por iones hidroxilo (OH^-) en las superficies de los óxidos de Fe y Al y, por otro, a la formación de complejos sulfo-alumínicos, al reaccionar con hidróxidos de aluminio.

Las propiedades de fijación y liberación del azufre se caracterizan por medio de curvas denominadas **isotermas de adsorción**, en

forma similar a las empleadas para el fósforo. Este aspecto es propio de la química de suelos; pero se menciona aquí, porque la fijación y liberación del azufre forma parte del ciclo de este elemento en el suelo. Por último, una consideración más detallada del azufre en el suelo se encuentra, por ejemplo, en Sánchez²⁹ y Fassbender^{9,10}.

RESUMEN

1. Uno de los elementos más importantes, en las interacciones planta-suelo-microorganismos, es el nitrógeno. Las reservas y transferencias globales de nitrógeno, dentro del sistema planta-suelo, son del siguiente orden (Rosswall²⁷):

Componente	Reservas (g/m ²)	Transferencias (g/m ² /año)
Plantas	94	planta-mantillo 19
N disuelto Interc.	23	N Interc-planta 19
Mantillo	20	mant-microorg. 6 mant-mat. org. 13
Materia orgánica	2300	mat. org.-microorg. 13

2. El ciclo del nitrógeno, en el ecosistema forestal, se ilustra con el ejemplo de un bosque montano de los Andes de Venezuela. En este ejemplo, sólo el cuatro por ciento de las reservas del ecosistema se encuentra en la vegetación (1107 Kg/ha), y un alto porcentaje en el suelo mineral (27 ton/ha) y en la capa de mantillo (583 kg/ha). Ello indica que este ecosistema es muy estable y que las entradas con la lluvia, así como las pérdidas, son irrelevantes para las reservas. La tasa de renovación (*turnover*) del nitrógeno es de seis años y medio.
3. Los datos sobre las reservas y transferencias de nitrógeno se complementan con dos ejemplos de plantaciones de teca (*Tectona grandis*), de seis y 25 años, en Venezuela y Africa, respectivamente, y un sistema agroforestal, compuesto por café, con un árbol leguminoso de sombra (*Erythrina poeppigiana*) en Costa Rica.
Aquí se confirma, nuevamente, que las mayores reservas se encuentran en el suelo mineral (94% en el sistema agroforestal, 57% en el rodal de teca venezolano y 68% en el africano).

4. El nitrógeno amoniacal, en la solución del suelo, está en equilibrio con el nitrógeno orgánico intercambiable, unido a los minerales de arcilla y a los coloides orgánicos. La cantidad de nitrógeno inorgánico intercambiable, excede raras veces el dos por ciento del nitrógeno total del suelo. La mayor parte de éste ocurre en forma orgánica y debe ser mineralizado, para poder ser asimilado por las plantas.
5. La mineralización del nitrógeno consiste en una serie de procesos, a través de los cuales los componentes orgánicos, ya sean materia orgánica o residuos vegetales y animales recién incorporados al suelo, se transforman a compuestos inorgánicos nitrogenados, tales como NH_4^+ , NO_2^- y NO_3^- , pasando casi siempre por las etapas siguientes: a) aminización, b) amonificación y c) nitrificación.
6. Las tasas de mineralización del nitrógeno dependen de varios factores, entre ellos: el tipo de arcilla, la acidez del suelo, la relación C-N, la capacidad de aireación del suelo y la humedad. El efecto de secado y posterior rehumedecimiento del suelo causa un aumento en la producción de nitrógeno mineral, en suelo seco al aire. La mineralización del nitrógeno y carbono orgánicos es más rápida bajo condiciones alternas de humedecimiento y secado. Este efecto se conoce como **efecto de Birch**.
7. La fijación del nitrógeno en el suelo sucede en dos formas: simbiótica y no simbiótica. La primera contribuye en gran proporción al crecimiento de las plantas en ámbitos tropicales. Los mecanismos biológicos y los procesos de control de fijación nitrogenada no simbiótica son muy similares a los procesos de fijación simbiótica.
8. Los procesos de fijación del nitrógeno están relacionados y controlados por la fisiología del organismo respectivo y dependen de la técnica seguida en su evaluación, de la edad de las plantas, del estado fisiológico de los nódulos y de diversos factores estacionales y ambientales, incluyendo la concentración de nitrógeno en el suelo.
9. Los ámbitos de fijación no simbiótica, en suelos promedio, son muy amplios, según varios autores. Oscilan entre 1 y 150 kg/ha/año. Algunos autores (Jaiyebo y Moore¹⁷) han sugerido cifras de hasta 650 Kg/ha/año.

10. El potencial de las especies arbóreas leguminosas para fijar N_2 es muy variable; la especie *Leucaena leucocephala*, conocida mundialmente como planta utilizada para reforestación, forraje animal, leña o protectora del suelo, puede fijar hasta 500 kg/ha/año de N_2 , mientras que el género *Casuarina* tiene un ámbito de fijación entre 58 y 218 Kg/ha/año.
11. Los mecanismos que conducen a las pérdidas de nitrógeno son: a) lixiviación; b) volatilización del amonio; c) erosión y d) desnitrificación. Se acepta, en general, que una cantidad apreciable de nitrógeno (hasta un 50% del N aplicado) se pierde en suelos tropicales cultivados, debido principalmente al lavado.
12. El fósforo es un elemento que usualmente limita el crecimiento de la planta, debido a que su concentración accesible a ésta (ión PO_4^{-3}) es muy baja en la mayoría de los casos. Existe predominantemente en formas insolubles, como apatita.
13. Las investigaciones sobre el ciclo del fósforo en ecosistemas forestales naturales son escasas. Se analiza la estabilidad de dos ecosistemas con respecto a P. El ciclo del P en el suelo se analiza con base en las entradas (fertilizantes), la disolución de los fosfatos inorgánicos, la mineralización de los orgánicos, la absorción por la planta y las interacciones entre los fosfatos orgánicos e inorgánicos.
14. La mineralización del P orgánico es similar a la del N orgánico, es decir, la formación de compuestos menos complejos (ácidos nucleicos, proteínas), a partir de sustancias polimerizadas (nucleoproteínas), con liberación de ácido fosfórico.
15. El potasio se encuentra muy extendido entre los minerales que constituyen la corteza terrestre. Las micas y feldespatos son muy importantes por su doble papel: a) fuerte contenido de potasio (hasta 7 - 8%); b) por su evolución, que conduce a la formación de arcillas.
16. En el ciclo del potasio son muy importantes sus adiciones por la lluvia, su liberación en los restos vegetales, su translocación al suelo mineral y posterior transformación y su tasa de renovación. Este ciclo se ilustra con el ejemplo de un ecosistema montano en los Andes venezolanos.

17. Los procesos dinámicos de liberación, retención ganancias y pérdidas del potasio, constituyen el ciclo de este elemento en el suelo. El K intercambiable, ligado al complejo arcilloso-húmico, se encuentra en equilibrio con la solución del suelo; por lo que, al ser absorbido por la planta o lavado, se produce su reposición en la solución del suelo, a partir del K cambiabile. Este proceso es muy importante, ya que se cuenta con una reserva disponible para la planta. Por otra parte, las pérdidas de K se suceden por lavado, erosión de la capa superficial del suelo, esorrentía y percolación profunda. Experimentos realizados en la zona cafetera de Colombia reportan pérdidas de hasta 235 kg/ha/año en el agua de percolación, en suelos sin cobertura vegetal, contra 101 kg/ha/año con cobertura viva.
18. El azufre, junto con el carbono y el nitrógeno, están sujetos a grandes transformaciones biológicas y a fuertes volatilizaciones por efecto de las quemas (para S entre un 60 y 75%).
19. Los suelos deficientes en azufre presentan una o más de las siguientes propiedades: a) ostentan altos contenidos de alófana u óxidos; b) son bajos en materia orgánica; c) son, a menudo, arenosos.
20. La mayor parte del azufre en los suelos tropicales se encuentra en forma orgánica. Su proceso de mineralización es similar al del N orgánico, así como su ciclo total, el cual se puede resumir así: la mineralización transforma el S en SH_2 y éste, al ser oxidado por microorganismos, es llevado a ión $\text{SO}_4^{=}$, el cual es utilizado directamente por las plantas, inmovilizado por los mismos microorganismos, lixiviado como sales (p.e. CaSO_4) o volatilizado como SO_2 . Los iones $\text{SO}_4^{=}$ pueden incorporarse al suelo a través de la lluvia, el agua de riego, fertilizantes, plaguicidas, gases de erupciones volcánicas y contaminantes industriales. Con el uso creciente de los fertilizantes en la agricultura, las deficiencias de azufre dejaron de ser un problema.

BIBLIOGRAFIA

1. ACQUAYE, D.K. 1963. Some significance of soil organic matter on soil organic phosphour nutrition of cocoa in Ghana. *Plant and Soil* 19:65-80 (original no consultado: citado por Sánchez, 1981).
2. BARTHOLOMEW, W.V. 1977. Soil nitrogen in the tropics. In Sánchez, P.H. (ed.). *A review of soils research in tropical Latin America*. N.C. State University Tech. Bul. 219. p. 68-90.
3. BERMUDEZ DE CASTRO, F. 1977. Angiospermas no leguminosas fijadoras de nitrógeno de la península ibérica. *Boletín de la Estación Central de Ecología (Madrid)*. 6(12):3-17.
4. BIRCH, H.F. 1960. Nitrification of soils after different periods of dryness. *Plant and Soil* 12:81-96.
5. _____. 1964. Mineralization of plant nitrogen following alternate wet and dry conditions. *Plant and Soil* 20:43-49.
6. BREWBAKER, J.L.; VANDER BELDT, R.; MACDICKEN, K. 1982. Nitrogen-fixing tree resources: potentials and limitations, p. 413-427. In Graham, P.H. y Harris, S.C. (eds.). *Biological Nitrogen Fixation Technology for Tropical Agriculture*. Taller. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia.
7. DOMMERGUES, Y. 1982. Ensuring effective symbiosis in nitrogen-fixing trees. p. 395-411. In Graham, P.H. y Harris, S.C. (eds.). *Biological Nitrogen Fixation Technology for Tropical Agriculture*. Taller. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia. 768 p.

8. EWEL, J.; BERISH, C.; BROWN, B.; PRICE, N.; RAICH, J. 1981. Slash and burn impacts on a Costa Rica wet forest site. *Ecology* 62(3):816-829.
9. FASSBENDER, H.W. 1983. Suelos y sistemas de producción agroforestales; notas de curso. Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza/GTZ. 150 p.
10. _____. 1975. Química de suelos; con énfasis en suelos de América Latina. San José, Costa Rica. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Serie Libros y Materiales Educativos No. 24. 398 p.
11. _____; GRIMM, U. s.f. Ciclos biogeoquímicos en un ecosistema forestal de los Andes Occidentales de Venezuela IV; modelos y conclusiones. *Turrialba* 31(2):101-108.
12. GRAHAM, P.H.; HARRIS, S.C. (eds.). 1982. Biological nitrogen fixation technology for tropical agriculture. Taller. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Colombia, Marzo 9-13. 1981. 7768 p.
13. GREENLAND, D.J.; NYE, P.H. 1959. Increases in the carbon and nitrogen contents of tropical soils under natural fallows. *Journal of Soil Science* 10:284-299.
14. GUERRERO, R.R. 1979. Algunos aspectos sobre el balance del nitrógeno en suelos tropicales I y II. *Suelos Ecuatoriales (Colombia)* 9(1):54-68.
15. HASE, H. 1981. Nährstoff reserven auf banco-standorten der waldreserve Caparo, Venezuela unter besonderer berücksichtigung der plantagenwirtschaft mitteak (*Tectona grandis*). (Reservas de nutrimentos en sitios de banco de la reserva forestal de Caparo, Venezuela, con especial consideración del rendimiento de teca). Disertación. Universidad Göttingen, 153 p.
16. HETSCH, W. 1976. Die beziehung von niederschlag und bodenbildung in der Andenkordillere Venezuela. (La relación entre la lluvia y el desarrollo del suelo en la cordillera andina de Venezuela). Dissertation. Universidad de Göttingen, 167 p.

17. JAIYEBO, E.O.; MOORE, A.W. 1963. Soil nitrogen accretion under different covers in a tropical rain forest environment. *Nature. England.* 197:317-318.
18. LUNA, Z.C.; SUAREZ, S.V. 1978. El potasio en suelos derivados de cenizas volcánicas. p. 37-44. In *Memorias V Coloquio sobre suelos; potasio y micronutrientes en la agricultura colombiana.* Suelos Ecuatoriales IX(2): 227 p.
19. LUNDGREN, B. 1978. Soil condition and nutrient cycling under natural and plantation forest in Tanzania highlands. Upsala. Swedish University of Agricultural Sciences. Dept. of Forest Soils. Report on forest ecology and forest soils 31. 426 p.
20. McCOLL, J.G. 1970. Properties of some natural waters in tropical wet forest of Costa Rica. *Bio Science* 20(2):1096-1100.
21. MEJIA, L.C. 1978. Mineralogía del potasio en el suelo y en el material parental. p. 1-18. In *Memorias V Coloquio sobre suelos; potasio y micronutrientes en la agricultura colombiana.* Suelos Ecuatoriales IX(2): 227 p.
22. NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. 1977. *Leucaena: promising forage and tree crop for the tropics.* Washington, D.C. 115 p.
23. _____. 1979. *Tropical legumes: resources for the future.* Washington, D.C. 331 p.
24. _____. 1980. *Firewood crops: shrub and tree species for energy production.* Washington, D.C. 237 p.
25. NWOBOSHI, L.C. 1980. Nitrogen cycling in a teak plantation ecosystem in Nigeria. In Rosswal, T. (ed.). *Nitrogen cycling in West African ecosystems.* SCOPE/UNEP/MAB/IITA. Ibadán, Nigeria. 450 p.
26. ODUM, E.P. 1980. *Ecología: el vínculo entre las ciencias naturales y las sociales.* México. Compañía Editorial Continental S.A. 295 p.

27. ROSSWALL, T. 1976. The internal nitrogen cycle between microorganisms, vegetation and soil. p. 157-169. In Svenson, B.H. and Soderlund, R. eds.). Nitrogen, phosphorus and sulphur-global cycles. SCOPE Report 7. Ecol. Bull (Stockholm) 22. 192 p.
28. SALAS, G. DE LAS; FOELSTER, H. 1976. Bioelement loss in clearing a tropical rain forest. Turrialba 26(2):179-186.
29. SANCHEZ, P.A. 1981. Suelos del trópico; características y manejo. Traducido de la versión inglesa por Edilberto Camacho. San José, Costa Rica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Serie de Libros y Materiales Educativos No. 48. 634 p.
30. SCHROEDER, D. 1974. Relationships between soil potassium and nutrition of the plant. p. 53-63. In Potassium; research and agricultural production. Proc. 10th Int. Congr. Int. Potash Inst. Budapest. Hungría (original no consultado. Citado por Mejía, 1978).
31. STEINHARDT, U. 1979. Untersuchungen über den wasserund naehrstoffhaushalt eines andinen wolkenwaldes in Venezuela (Investigaciones sobre las reservas de agua y nutrientes en un bosque andino nublado en Venezuela). Göttingen Bodenkundliche Berichte 56:1-185.
32. STICHER, H. 1972. Potassium in allophane and in zeolites. p. 43-51. In Potassium in soil. Int. Potash. Inst. Bern. Switzerland (original no consultado. Citado por Mejía, 1978).
33. SUAREZ DE CASTRO, F.; RODRIGUEZ GRANDAS, A. 1962. Investigaciones sobre la erosión y la conservación de los suelos en Colombia. Bogotá, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 473 p.
34. VALLE, I.J. DEL. 1978. Efecto del secado de suelos de origen volcánico en la mineralización del nitrógeno y la productividad. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 9(1):9-15.

CAPITULO 10

ECOSISTEMAS FORESTALES DE AMERICA TROPICAL

Generalidades

Este capítulo se propone ilustrar algunas características relevantes de los ecosistemas forestales naturales, con especial referencia al ámbito húmedo de América Tropical. El lector comprenderá que, por ser un campo tan extenso, necesariamente debe existir una selección en los ejemplos de los ecosistemas que se pretenden presentar, lo cual —¿por qué no decirlo?— se ve afectado por la experiencia del autor, por la información disponible y también por sus preferencias. Todo esto, sumado a las limitaciones que impone un capítulo de un libro no especializado en bosques, obliga al autor a dejar información de lado y a remitir al lector a la literatura especializada.

BIENES Y SERVICIOS

Bienes

El bosque natural ofrece al hombre diversos bienes (valores). Dawkins⁹ clasifica estos valores en fisiológicos, físicos y culturales.

- a. **Bienes fisiológicos:** Son los producidos directamente por el ecosistema. Los más importantes son los siguientes: madera, leña y carbón, frutos, plantas ornamentales y medicinales, látex, fibras vegetales, pulpa de madera, animales y sus pieles, suelo y sus nutrientes y agua.

La utilidad de las maderas es muy variada, de acuerdo con sus propiedades físicas y mecánicas. Las de mejor calidad provienen de árboles como cedro (*Cedrela sp*), caoba (*Swietenia sp*), tornillo (*Cedrelinga cataeniformis*), lupuna (*Chorisia sp*). Se utilizan generalmente en las industrias de muebles, láminas, pisos, enchapados y decoración. Las maderas de escaso valor comercial para los fines anteriores, se utilizan en la fabricación de pulpa para papel y cartón.

La leña y el carbón se obtienen principalmente del bosque secundario y son utilizados por la población rural, con el fin de satisfacer sus necesidades energéticas.

La perpetuidad de las especies maderables depende del tipo de explotación del bosque y de los tratamientos silviculturales.

Otros productos del bosque considerados como no maderables provienen de plantas y animales. Los más importantes son: nueces, plantas medicinales, chicle, caucho, palmas, orquídeas, animales vivos y de caza. Dourojeanni (comunicación personal) estima entre 11 000 y 15 000 las especies de plantas superiores que ofrecen recursos florísticos no maderables. El Cuadro 25 resume algunos de los bienes más importantes del bosque del trópico húmedo americano.

CUADRO 25: Algunos bienes del bosque natural del trópico húmedo americano.

Producto	Nombre Común	Nombre Científico	Distribución	Producción
PALMAS	Pijuayo (Perú)	<i>Guillemia (Bactris)</i>	Perú, Colombia	frutos
	Pejibaye (Costa Rica)	<i>gaspaes</i> (HBK) Bailey	Brasil, Bolivia	comestibles
	Chontaduro (Colombia)		Costa Rica	palmito
	Pupunha (Brasil)		Tierras Bajas	
	Tembé (Bolivia)	<i>Guillemia insignis</i>	200 - 2000 m	
	Naidi,	<i>Euterpe</i>	1000 - 2500 mm	
	Manaca,	<i>oleracea</i> Mart.	Brasil, Venezuela	Palmito aceite fibras
			Colombia,	

Continuación Cuadro 25

Producto	Nombre Común	Nombre Científico	Distribución	Producción
PALMAS	Huasai, Assai		Costa Rica	alcohol
	Huicungo	<i>Astrocaryum</i> sp	América tropical	frutos
	Palma real			aceite
	Chembira			madera
	Chonta			fibra
	Ungurahui, Seje,	<i>Jessenia polycarpa</i> Karst.	América tropical	frutos aceite
	Mil pesos, Jagua			
	Aguaje	<i>Mauritia flexuosa</i> L.	América tropical	frutos
	Moriche	<i>Mauritia vinifera</i>		aceite
	Tagua	<i>Phytelephas macrocarpa</i>		fibra
Yarina	<i>Oenocarpus panamanus</i>	Costa Rica, Panamá	hojas frutos	
Maquenque			madera	
		<i>Socratea durissima</i> (Oerst) Wendl	Nicaragua, C. Rica, Panamá, Colombia, Perú	
Iriartea	<i>Iriartea gigantea</i> Wendl. ex Burret	Colombia, Perú	palmito madera	
Súrtuba	<i>Geonoma interrupta</i>	Centro América Venezuela	fruto	
ARBOLES FRUCTIFEROS	hobo, jobo	<i>Spondias mombin</i>	América tropical	frutos
	Caimito	<i>Chrysophyllum caimito</i>	América tropical	frutos
	Cacao	<i>Theobroma cacao</i>	"	"
	Zapote	<i>Matisia cordata</i>	"	"
	Sachacashu	<i>Anacardium occidentale</i> L.	"	nueces
	Castaña do Pará	<i>Bertholletia excelsa</i> H.B.K.	Brasil, Colombia, Perú	nueces
	Leche caspi	<i>Couma macrocarpa</i>	Amazonía	gomas
	Arbol de leche	<i>Brosimum galactoforum</i>	Amazonía	gomas
	Balata	<i>Manilkara bidentata</i>	Amazonía	caucho
	Jebe, shiringa	<i>Hevea brasiliense</i>	Amazonía	caucho
Caucho	<i>Castilla elastica</i>	Amazonía	caucho	
PLANTAS MEDICINALES	Guaraná	<i>Paullinia cupana</i>	Amazonía Orinoquía	
	Cupana			
	Ipecacuana	<i>Cephaelis ipecacuanha</i> Rich	Amazonía Tierras bajas de Colombia y Ve- nezuela	
	huingo, totumo	<i>Crescentia cujete</i> H.B.K.	América tropical	
	jícaro	<i>Crescentia alata</i>	"	
	Coca	<i>Erythroxylon coca</i>	"	
	Chuchuhuasi	<i>Erythroxylon catuaba</i>	"	
	Cashavara	<i>Ficus antihelminticus</i>	"	
	Ojé	<i>Croton dracooides</i>	"	
	Sangre de Drago	<i>Lonchocarpus nicou</i>	"	
Barbasco, Cube	<i>Chinchona spp</i>	"		
Quina				

El suelo de extensas áreas boscosas naturales o explotadas es valioso por la producción de árboles, plantas diversas, forraje y otros productos. Dicho suelo está protegido de la erosión y mantiene un nivel de nutrimentos constante, debido al ciclo cerrado que se sucede en el bosque. Este nivel de nutrimentos, aunque bajo*, es muy valioso. La fertilidad natural del suelo se debe principalmente a la descomposición de la materia orgánica. Los nutrimentos almacenados en el bosque enriquecen las aguas que utilizan los peces para su supervivencia (C. Berger, comunicación personal oral, Lima, 1982). Por la erosión natural, se pierden ricos sedimentos, que van a parar a los valles aluvionales donde se practica la agricultura.

Los nutrimentos son removidos del bosque por la extracción de madera (biomasa), quema, agricultura y ganadería de subsistencia y extensiva, respectivamente. Se adicionan, a su vez, nutrimentos por la acción de la quema.

El agua contenida en los reservorios es uno de los valores más importantes del bosque, sobre todo en cuencas altas.

- b. **Bienes físicos:** En los bosques naturales, están representados por la estabilidad del suelo, el control de la escorrentía superficial e inundaciones, las influencias climáticas (regulación de temperatura y humedad, control de plagas y enfermedades) y los reservorios de agua.
- c. **Bienes o valores culturales:** El valor cultural más grande del bosque y de mayor significación inmediata, para el desarrollo del trópico húmedo americano, lo constituye su potencial recreativo y turístico. Los bosques naturales con sus árboles gigantes, vida animal espectacular, montañas y ríos, representan un recurso escénico de gran valor económico. Además son escenarios excelentes para estudiantes y científicos, los cuales deben estudiar problemas de significación para toda la humanidad.

Servicios

Los servicios del bosque pueden asimilarse a la utilización que hace el hombre de sus bienes o valores. En forma somera, se enumeran los más importantes:

* Se exceptúan algunos suelos de origen aluvial, ricos en sedimentos y de una fertilidad relativamente alta. Este es el caso de las formaciones pantanosas de Varzea (Brasil) y Guandal y Catival (Colombia, Panamá y Costa Rica).

protección de fauna y flora y albergue de capital genético;
 rompevientos provistos por árboles como eucalipto, ciprés, casuariana y otros;
 sombra provista por árboles frondosos como *Anacardium* y *Samán*;
 cercos vivos de arbustos como *Gliricidia sepium*, *Erythrina spp*;
 madera para cercos (diversas especies);
 forraje provisto por árboles como *Leucaena sp*, *Gliricida sp*, *Erythrina spp*;
 control de erosión con especies como *Leucaena sp*;
 energía hídrica, por aprovechamiento del agua de los reservorios, y calórica, por utilización de leña y carbón vegetal;
 regulación del régimen hídrico y mantenimiento de la calidad del agua;
 control biológico de plagas y enfermedades;
 influencia moderadora sobre el clima local;
 reciclaje de nutrimentos;
 recreación y turismo.

La vegetación

La mayoría de los ecosistemas forestales (dentro de sus respectivos bioclimas) se caracteriza por poseer una vegetación específica y soportar una comunidad única de plantas y animales. Las diferencias entre las formaciones obedecen generalmente a variaciones en la temperatura y en la precipitación. Con una biotemperatura anual promedio, la diversidad de especies, la estratificación del bosque y su altura, su productividad y grado de epifitismo, aumentan con la precipitación. Asimismo, la temperatura condiciona la fisionomía y tamaño de la vegetación. Otros factores inducen cambios locales en el tipo de vegetación, haciendo que, en su ámbito de influencia, la comunidad vegetal esté correlacionada en forma estrecha con los suelos, las sales, los arrastres por río (aluviones) o por gravedad (coluviones) u otros fenómenos localizados. El National Research Council⁴⁰ estima la cubierta vegetal tropical en 1500 millones de hectáreas (31% de la región tropical y 10% de la superficie terrestre del globo). La mayor extensión ocurre en América Tropical, con 45% del ámbito húmedo tropical, seguido por Africa (30%) y Asia Tropical (25%). La mayor parte de esta vegetación se localiza en la zona baja, alrededor del 10% ocurre en formaciones premontanas, 5% en formacio-

nes montano bajo, 2% en la faja montano, 1% en formaciones alpinas y menos de 1% a mayor elevación (NRC⁴⁰. El Cuadro 26 resume algunas características típicas de ecosistemas boscosos en el trópico.

CUADRO 26: Características sobresalientes de algunos ecosistemas de bosque en el trópico americano.

Formación	No. especies/ha	Altura Copas (m)	No. Estratos	Suelos	Observaciones
Bosque húmedo (lluvioso, muy húmedo) tropical	40 - 100	30 - 60	2 - 3 a veces ninguno	infértiles Oxisoles, Ultisoles, Spodosoles, Inceptisol	árboles con raíces tablares, presencia de lianas y epífitas, flores caulinares.
Bosque de pantano (ej: catival, manglar)	1 - 5	30 - 50 inferior para manglar	1	Inceptisol. fértiles Entisoles (Sulfaquents)	raíces con neumatóforos (para manglar), viviparismo. Asociaciones edáficas.
Bosque tropical premontano (húmedo o pluvial)	26 - 50	20 - 40	2 - 3	variables Inceptisol. Ultisoles	raíces tablares pequeñas o ausentes; muchas trepadoras, abundante epifitismo, caulifloría rara.
Bosque tropical montano bajo (húmedo y lluvioso)	15 - 40	10 - 30	2 - 3	variables Inceptisol. Ultisoles Entisoles	abundante epifitismo ausencia de raíces tablares
Bosque tropical (seco y muy seco)	10 - 20	10 - 30	2	variables Entisoles Inceptisol.	

El Cuadro obviamente no es una clasificación bioclimática de las formaciones vegetales del trópico. Este tema puede ser consultado en Hueck²⁸, Beard², Ellenberg y Mueller-Dombois¹², entre otros.

FUENTE: National Research Council⁴⁰; Richards⁴⁴; Holdridge²⁶.

CUADRO 27. Distribución de los suelos del trópico americano.

Grupo General de Suelos	Superficie (millones de hectáreas)	%
Suelos ácidos infértiles (Oxisoles, Ultisoles)	938	82
Suelos moderadamente fértiles, bien drenados. (Alfisolos, Vertisoles, Mollisoles, Andepts, Tropepts, Fluvents)	44	7
Suelos pobremente drenados (Aquepts)	42	6
Suelos muy infértiles arenosos (Psamments, Spodosoles)	16	2
Suelos superficiales (Entisoles líticos)	19	3
Suelos orgánicos (Histosoles)	n.r.	n.r.

FUENTE: Sánchez y Cochrane⁴⁸

Los suelos

Los suelos de los ecosistemas forestales del trópico americano son muy variables. El Cuadro 27 da una idea de la distribución de los suelos en este ámbito geográfico.

El Cuadro obviamente no es una clasificación bioclimática de las formaciones vegetales del trópico. Este tema puede ser consultado en Hueck²⁸, Beard², Ellenberg y Mueller-Dombois¹², entre otros.

Como se aprecia claramente en el Cuadro 27, los suelos infértiles ocupan la mayor superficie. Los Oxisoles poseen excelentes propiedades físicas, mientras que los Ultisoles, aunque poseen una morfología similar, presentan un aumento en la fracción arcilla con la profundidad, lo cual influye en el libre movimiento del agua. Cuando ocurren en pendientes, son susceptibles a la erosión (Sánchez y Cochran⁴⁸). Tanto los Oxisoles como los Ultisoles poseen muy bajos niveles de fertilidad; alta acidez; niveles altos de aluminio con alta capacidad de fijación del fósforo; deficiencias en nutrimentos como calcio, magnesio, azufre, cinc y otros elementos esenciales para las plantas. Presentan, además, una baja capacidad de intercambio catiónico efectiva. A favor de estos tipos de suelos, existen evidencias de que, después de la deforestación, la formación de laterita es mínima (Sánchez y Buol), lo que desvirtúa así la opinión —generalizada y pregonada por varios ecólogos— de la laterización de terrenos bajos tropicales sometidos al uso conocido como tumba-roza-quema. Estos autores afirman que sólo el seis por ciento de la región amazónica presenta una plintita suave en el subsuelo; este material es susceptible de endurecimiento al ser expuesto a la erosión, pero la mayoría de estos suelos ocurren en sitios planos pobremente drenados. En donde se presenta laterita de origen geológico, se tiene la ventaja de que puede aprovecharse como material de relleno en la construcción de carreteras (Sánchez y Buol).

Solamente un siete por ciento de los suelos posee moderada fertilidad y corresponde a los **Alfisolos**, **Vertisoles**, **Mollisoles**, **Inceptisoles** y **Entisoles**. Los dos últimos grupos están constituidos por suelos jóvenes, con horizontes bien definidos (A, B y C) en Inceptisoles y no diferenciados en Entisoles. Los primeros dos pueden ser pobremente drenados (*Aquepts*), bien drenados de origen volcánico (*Andepts*) o de origen no volcánico (*Tropepts*). Los pobremente drenados ocupan grandes extensiones de las denominadas **varzeas** en la Amazonía del Brasil y en las formaciones pantanosas de palmas, lla-

madras **aguajales** en Perú y **morichales** en Colombia (*Mauritia flexuosa* y otras especies).

Los Alfisoles presentan gran similitud con los Ultisoles y Oxisoles en sus características morfológicas, pero tienen un alto contenido de bases. En el Brasil, los Alfisoles están identificados como **Terra Roxa Estruturada**.

Según la clasificación de la FAO, corresponden a *Luvisoles* y *Eutric Nitosoles* y ocurren cerca de Altamira, Río Branco, Porto Velho y región cacaotera de Bahía en el Brasil, en la Selva Alta del Perú y en la costa húmeda del Ecuador.

Los **Podsoles** tropicales (**Spodosoles**) ocupan, en realidad, un escaso porcentaje (2%) en el trópico húmedo americano. En la Amazonia del Brasil han sido identificados por Klinge³⁰ como **Podsoles gigantes**. El Proyecto RADAM del Brasil (citado por el National Research Council —NRC—), ha identificado extensas áreas de Spodosoles a lo largo de las cabeceras del Río Negro. En Venezuela, Herrera²³ (citado por Jordan), ha investigado este grupo de suelos en la Cuenca de San Carlos de Río Negro. En Colombia, en la región andina, tales suelos fueron descritos por Jenny en los años cincuenta como Podsoles gigantes, pero en realidad se trata de suelos *Andepts* derivados de cenizas volcánicas, fuertemente meteorizados y con un período de intemperización policíclica. Su similitud con los Podsoles se debe a un típico horizonte de lavado y a una banda de acumulación de hierro.

La fauna

La fauna silvestre del trópico húmedo americano es muy poco conocida. Está conformada en su mayoría por invertebrados, los cuales podrían elevarse fácilmente a 600 especies de reptiles y batracios sumados (Dourojeanni¹⁰). Este autor opina que un 85% de las aves y un 82% de los mamíferos tropicales son endémicos y que esta proporción es aún más elevada en los invertebrados. La gran diversidad de la fauna tropical es una de sus características más sobresaliente.

Las especies de mamíferos son generalmente de tamaño pequeño, a diferencia de los de África y Asia. Según datos de Dourojeanni¹⁰, el animal de mayor peso vivo es el tapir, con 300 Kg. Los pecaríes pesan —según el mismo autor— entre 20 y 30 Kg y los venados de 16 a 21 Kg. Investigaciones de Fittkau y Klinge (citados por Dou-

rojeanni¹⁰), comprobaron que la biomasa de vertebrados terrestres contribuye muy poco (10-30 Kg. desde batracios hasta mamíferos) a la biomasa total. Otra parte está compuesta por los invertebrados (ácaros, colémbolos, termitas y hormigas), cuyo peso se eleva a unos 200 Kg/ha.

El Cuadro 28 representa una muestra de la contribución de la fauna a la alimentación rural de la Amazonía peruana.

CUADRO 28. Contribución de especies de fauna a la alimentación rural en la Amazonía peruana.

Especies	Región	
	Río Ucayalí %	Río Pachitea %
Caza menor		
<i>Cuniculus paca</i>	14.8	16.5
<i>Geocelone denticulata</i>	9.9	17.2
Monos (<i>Ateles</i> , <i>Lagothrix</i> , <i>saimiri</i>)	9.3	6.6
<i>Dasyprocta</i>	5.8	5.7
Aves (<i>Mitu</i> , <i>Crax</i> , <i>Penelope</i>)	3.1	2.5
<i>Dasypus</i>	5.1	2.1
Caza menor		
<i>Tayassu tajacu</i>	12.6	16.6
<i>Tayassu pecari</i>	21.1	3.1
<i>Mazama americana</i>	8.1	17.4
<i>Tapirus terrestris</i>	10.1	6.8
<i>Hydrochoerus e Hydrochaeris</i>	—	5.4

FUENTE: Dourojeanni¹⁰.

DESCRIPCION SINTETIZADA DE ALGUNOS ECOSISTEMAS

Ecosistemas de zonas bajas

A. Amazonía Central, Brasil (Klinge *et al*³²; Brüinig y Klinge⁴; Klinge y Rodríguez³²; Klinge³⁰; Klinge y Fittkau³¹).

Estratificación y altura de los árboles

Este ecosistema, descrito por los autores mencionados, enumera la existencia de varios estratos en términos generales, pero la información no se apoya en análisis cuantitativos. Las alturas máximas oscilan entre 35 y 40 metros y entre 25 y 30, según otros autores. El Cuadro 29 representa la estratificación del bosque lluvioso del ecosistema.

Todo los estratos están entrelazados por lianas, muchas de las cuales tienen diámetros bastante gruesos. Las Epífitas vasculares son raras; hay algunas semiepífitas, saprófitas y parásitas. Las hojas de las palmas y las hojas viejas de muchos árboles están cubiertas abun-

dantemente con algas y briófitas. Las copas del estrato superior tienen un diámetro promedio de 40 metros. En los estratos inferiores, las copas ostentan una forma cónica y son más estrechas.

CUADRO 29. Estratificación del bosque lluvioso de "tierra firme".

Estrato a/	Dosel Superior (m)		Dosel Superior (m)		Individuos por ha.
	Promedio	Rango	Promedio	Rango	
A	35.40	38.10 - 32.10	23.70	29.00 - 20.00	50
B	25.90	30.50 - 20.40	16.70	24.60 - 8.70	315
C ₁	14.50	21.90 - 10.05	8.40	8.70 - 2.70	775
C ₂	5.90	11.00 - 2.70	3.60	7.80 - 0.70	2920
D	3.00	4.50 - 1.55	1.70	2.90 - 0.20	36 070
E	1.00	1.50 - 0.20	0.10	0.20 - 0.05	83 650
					93 780

a/ Estratos: A: pocos árboles emergentes; B: estrato discontinuo, verticalmente no bien definido, de árboles codominantes; C₁: estrato inferior, compuesto principalmente de individuos jóvenes o suprimidos de especies dominantes en el estrato superior. Ocasionalmente hay palmas con fuste; Estratos C₂ y D: soto-bosque continuo, mal definido verticalmente, con muchos renuevos y muchas palmas sin tallo; Estrato E: dominado por palmas acaules y compuesto principalmente por plántulas y brinzales.

FUENTE: Klinge y Rodríguez³².

El número total de árboles, incluyendo lianas, palmas y herbáceas por unidad de área, varía mucho de acuerdo con el tipo de bosque y las diferencias de sitio, estados de desarrollo de la vegetación y modelos de distribución espacial. En los levantamientos hechos en Manaos, la densidad por hectárea de todos los árboles, incluyendo las palmas con diámetros superiores a 20 cm (diámetro a la altura del pecho), fue de 94 000 individuos (ver Cuadro 29). La cifra concuerda con estudios de otros autores realizados en el mismo tipo de bosque de la Amazonia Central. En los bosques de Borneo, Sudeste de Asia, Brüning y Klinge⁴ reportan un número de árboles de entre 8000 y 12 133 por hectárea (árboles mayores de 2 cm de diámetro), cifra similar a la dada por Amazonia Central, si se tienen en cuenta las variaciones en área basal y en las parcelas seleccionadas para el inventario.

Los diámetros medidos para este ecosistema varían entre 5 y 35 cm, con algunos ejemplares más gruesos. Dicho espectro diamétrico concuerda con la opinión de Schulz⁵⁰, en el sentido de que las pluviselvas de América Tropical no desarrollan diámetros gigantescos, debido a que se encuentran en un permanente estado de renovación. Para el sitio de la Amazonia Central del Brasil, la relación altura/diámetro varía con las especies, el sitio y la edad. Los árboles emergentes poseen, con frecuencia, relaciones entre 25 y 50; los árboles en el estrato B, alrededor de 50; y los árboles en el estrato inferior, entre 60 y arriba de 100.

La fitomasa del ecosistema de Manaus fue reportada en el Cap. 6 (ver Fig. 12). La fitomasa de este ecosistema, incluyendo árboles, palmas, raíces epífitas, lianas y otros es del orden de 2000 ton/ha. El volumen correspondiente de los árboles por encima de 15 cm de diámetro, asciende a 385m³/ha y a 304m³/ha para individuos por encima de 25 cm de diámetro. Estos volúmenes y su biomasa fresca correspondiente, están dentro de los ámbitos reportados por otros autores y por los estudios de inventario de la FAO, hechos en la parte sur del río Amazonas. Comparado con otros bosques húmedos tropicales, el volumen promedio de este ecosistema es más bien bajo. Se considera, igualmente, que no es el más exuberante bosque en la Amazonía Tropical, lo que concuerda con las apreciaciones ya reportadas de Schulz⁵⁰.

La estructura florística del bosque de Manaus, con base en el inventario de parcelas de muestreo de 0,1 ha, arroja el siguiente resultado: las cinco familias dominantes son Moraceae, Lauraceae, Leguminosae, Lecythydaceae y Sapotaceae, las que en promedio representan entre el 50% y 60% de todas las especies y entre el 50% y 70% de todos los individuos. Algunos autores reportan otras proporciones y dominancias de distintas familias, debido a razones de diferente escala en el levantamiento florístico, a desemejanzas en el tamaño mismo de las parcelas y a otros factores. Generalmente, en la Amazonía Central, existen otras familias, cuya abundancia merece mencionarse. Estas son: Apocynaceae, Anonaceae, Rosaceae, Chrysobalanaceae, Burseraceae, Euphorbiaceae, Myrtaceae, Olacaceae, Humiriaceae. Estas familias representan un promedio de entre 20% y 40% del número total de especies y de entre 20% y 50% de todos los individuos. Las palmas están bastante bien representadas. Las especies sin tallo pertenecen a los estratos bajos del bosque y se insertan sólo cuando los levantamientos incluyen los tamaños muy pequeños de la vegetación. Unas pocas especies de palmas poseen tallo y pertenecen al estrato medio del bosque, cuya altura en promedio es de 15 m. En general, el número de familias es de alrededor de 55 y de aproximadamente 500 especies. Si se incluyen las palmas, pequeñas hierbas, vegetación rastrera y epífitas, el número total de familias asciende a 70 y el número de individuos a 700.

La información sobre el *status* nutricional, la materia orgánica y las transferencias de bioelementos dentro del ecosistema, están reportadas en otros estudios y se resumieron comparativamente en capítulos anteriores. En el Cap. 13, se resumen algunas características

químicas de los suelos amazónicos, las cuales se comparan con otros datos para suelos boscosos de América Tropical (ver Cuadro 64).

B. Ecosistema amazónico de Venezuela

Este ecosistema ha sido descrito en numerosos informes y publicaciones. Se trata de un proyecto internacional, ya referido en el Cap. 9, dedicado a una vegetación denominada **caatinga amazónica**, perteneciente a la cuenca del Río Negro, Territorio Federal Amazonas, Venezuela. Los tipos de vegetación cambian desde Caatinga alta hasta Caatinga baja, denominada en el lugar **bana**. La variación está de acuerdo con un gradiente hidro-edáfico, lo que hace característico este paisaje florístico. Junto al paisaje, existe otro, florísticamente distinto, dominado por la especie *Eperua purpurea* (Yévaro). La especie dominante en la caatinga alta es *Micrandra spruceana* y *Eperua leucantha*, la última como subdominante. Otras especies dominantes (reportadas por Brüinig⁵ y Veillon⁵⁴) corresponden a las familias Bursereceae, Euphorbiaceae, Leguminoseae, Miristicaceae, Mirtaceae y varios géneros de palmas. Estas especies medran sobre suelos típicos de las caatingas, es decir, terrenos planos de suelos espodosoles, arenosos, periódicamente saturados de agua y parcialmente inundados. Veillon⁵⁴ reporta, en sus estudios, que existen diferencias en composición florística y crecimiento, tanto en diámetro como en volumen de las especies, debido a que se encuentran diferentes tipos de gradientes hidroedáficos. Así, existe un bosque de tipo **Yevaral** sobre suelos de mejor calidad que el de parcelas medidas en tipos denominados localmente **bana alta**, sobre arenas blancas cuarzosas. Otras especies dominantes mencionadas por Veillon son las siguientes: *Swartzia* spp, *Eschweilera* spp, *Ocotea costulata* y *O. guyanensis*, *Licania heteromorpha* y *Ragala* spp.

CUADRO 30: Características dasométricas del bosque de San Carlos de Río Negro (promedio de 88 parcelas; 7.1 has).

Tipo de Bosque	N/ha > 10 cm.d	G/ha > 10 cm.d (m ²)	V/ha (m ³)	Incremento/ha/año		
				d (cm)	G(m ²)	V(m ³)
Yevaral (57 parcelas)	456	24 - 40	244— 375	0.17-0.22	0.41— 0.45	4.5— 5.8
Bana alta (31 parcelas)	944	35	278— 290	0.11-0.12	0.34-0.40	3.5— 4.1

N: número de árboles; G: Area basal; V: volumen; d: diámetro a 1.30 m.

FUENTE: Veillon (datos reproducidos con permiso del autor).

El clima del ecosistema mencionado corresponde a uno ecuatorial muy húmedo, sin meses áridos. La pluviosidad media anual alcanza a 3500 mm, la temperatura media anual a 27°C.

El número de árboles/ha varía de 400 a 944, el Area Basal de 24 a 40 m²/ha, el volumen de los fustes de 374 a 577 m³/ha. El crecimiento/ha/año es de 0.11 a 0.22 cm; el del Area Basal, de 0.34 a 0.45 m² y el de volumen, de 3.5 a 5.8 m³. Es decir, el 1.2 a 2.5% del volumen total de los fustes. El Cuadro 30 resume algunos datos biométricos del bosque mencionado.

Además de los podsoles (*Tropaquods*) tropicales mencionados, existen suelos derivados de material plintítico antiguo (laterita), los cuales muestran solamente un horizonte A moderadamente desarrollado, cubriendo una arcilla con abundantes concreciones férricas (Herrera²³). Estos suelos presentan elevada acidez y muy baja fertilidad. El tipo de bosque denominado Bana se localiza —como se mencionó— en la parte superior de un gradiente fisiográfico, que se extiende desde los sitios bajos más húmedos hasta las partes altas (domos arenosos o bana). Klinge y Medina³⁴ describen este paisaje como **caatinga amazónica baja** o **campina baja** (en portugués: *caatinga baixa, campina baixa*). Florísticamente corresponde a un rastrojo esclerófilo denso, de 15 a 17 m de altura. El Cuadro 31 ilustra la composición florística y la fitomasa del paisaje de alta y baja caatinga en San Carlos de Río Negro.

CUADRO 31: Composición florística y fitomasa de la alta y baja caatinga amazónica en San Carlos de Río Negro, Venezuela.

Paisaje	Especies (porcentajes)				Fitomasa aérea (kg/m ²)		
	Micrandra spruceana	Manilkara sp.	Eperua leucantha	Otras	árboles	hojas	musgos
Caatinga alta (altura máxima 25.4 m diámetro máx. 41.7 cm)	45	8	14	33	42.67	1.89	0.48
Caatinga de transición	14	< 1	1	85	67.44	2.58	0.09
Caatinga baja (altura máx. 11 m., diámetro máx. 11.8 cm)	1	< 1	0	99	17.00	1.31	0.34

FUENTE: Klinge y Medina³⁴

C. Amazonía colombiana

Por tratarse de una superficie muy grande y de tres regiones fitogeográficas, (selva densa exuberante, selva densa y sabanas de las terrazas, y selva mixta de bosques y sabanas), se describe aquí someramente el paisaje de selva densa exuberante.

Este tipo de selva corresponde a los grandes interfluvios de los ríos Amazonas, Putumayo, Caquetá y Apaporis. Está localizada en la parte sur de la Amazonía y comprende una superficie aproximada de 15 944 000 hectáreas —42% del total— (Proyecto Radargramétrico Amazonas^{4 1}).

La vegetación está compuesta en su gran mayoría por un bosque maduro con profusión de parásitas y epífitas. Los árboles emergentes pueden alcanzar una altura de hasta 40 m y diámetros superiores a 40 cm. En el estrato superior predominan especies de las familias Lecythidaceae, Caesalpiniceae, Mimosaceae, Papilionaceae y Miristicaceae.

El bosque es muy heterogéneo, aunque ocasionalmente predominan asociaciones de palmas como la *Mauritia flexuosa*, especie característica de sitios mal drenados. Las especies predominantes en la región de este paisaje de selva densa son: cabo de hacha (*Iryanthera laevis*), amarillo (*Nectandra* sp), camino real (*Ocotea cuprea*), sangre toro (*Virola carinata*), guamo (*Inga acrocephala*), carguero (*Couretari* o *Lecythis*), caimarón (*Pourouma cecio*), dormilón (*Parkia multijuga*) y Siringa (*Hevea guianensis*).

Fisiográficamente, el sitio se caracteriza por poseer un relieve de terrazas y superficies de erosión, en donde la disección del terreno es pronunciada, debido al gran número de caños y afluentes secundarios.

Los suelos de esta región corresponden a arcillas de origen sedimentario, de colores rojizos y amarillentos, con manchas grisáceas, de una textura pesada y de baja fertilidad. Están localizados en terrenos ondulados y fuertemente ondulados, entre 7% y 25%. Se caracterizan por poseer superficies que contienen concreciones petroféricas, por su drenaje natural variado, en algunos paisajes impedido y en otros de moderado a bueno. Los suelos típicos de esta región presentan colores pardo oscuro y pardo amarillentos en la superficie, y rojizos en los estratos subyacentes. Son suelos con alto contenido de carbono orgánico, muy ácidos y, en algunos sitios, con horizontes Ao constituídos por delgadas capas de materia orgánica semidescompuesta (entre dos y cinco cm de espesor). Corresponden taxonómicamente al orden de los Inceptisoles (*Oxichumitropept*, *oxicdystropept* y *aquic dystropept*).

El Cuadro 32 resume la distribución florística y la frecuencia y dominancia de las principales especies del bosque de selva densa.

CUADRO 32: Distribución y dominancia de las especies más representativas del bosque de selva densa (terrazas y sup. de erosión), Amazonas, Colombia.

Especies		Frecuencia (%)	Dominancia (Área Basal) (%)
<i>Pouteria sp.</i>	Caimo	3.32	5.35
<i>Inga sp.</i>	Guamo	3.33	3.96
<i>Vírola sp.</i>	Sangretoro	3.12	3.78
<i>Hevea sp.</i>	Siringa	2.91	1.88
<i>Lecythis sp.</i>	Carguero	2.45	4.63
<i>Eschweilera sp.</i>	Matamá	2.50	5.16
<i>Parkia sp.</i>	Dormilón	2.32	2.79
<i>Nectandra sp.</i>	Amarillo	2.30	1.43
<i>Ocotea sp.</i>	Comino real	2.14	1.33
<i>Poulsenia sp.</i>	Majagua	1.84	2.10

FUENTE: Proyecto Radargramétrico Amazonas⁴¹

Las características dasométricas para distintos tipos del bosque amazónico se resumen en el Cuadro 33.

CUADRO 33: Características dasométricas del bosque amazónico colombiano.

Región Fitogeográfica	N/ha >25 cm.d	G/ha >25 cm.d (m ²)	V/ha (m ³)	
			total	comercial
I. Selva densa exuberante	109	14.6	126.8	21.4
II. Selva densa y sabanas	86	11	88.9	18.9
III. Selva mixta de bosque y sabanas	96	13	91.1	11.10

Los valores corresponden a promedios de tipos de bosque de llanura aluvial, superficies de erosión y disectadas.

FUENTE: Proyecto Radargramétrico Amazonas⁴¹ (adaptado).

D. Bosque húmedo tropical, Carare, Opón, Colombia

Este ecosistema es representativo de miles de hectáreas del paisaje geográfico del Valle Medio del Magdalena, Colombia. El sitio investigado está localizado a 50 Km al sur de la ciudad de Barrancabermeja, entre los ríos Carare y Opón. El clima corresponde a un bosque húmedo tropical, en la clasificación de Holdridge²⁶, con las siguientes características: precipitación promedio anual de 3000 mm; temperatura promedio anual de 27°C a 29°C con variaciones diarias muy grandes (22°C mínimo y 34°C máximo). Se suceden dos períodos de escasas lluvias (enero-febrero y julio). El Valle Medio del Magdalena se considera de origen terciario y en la región de investigación ocupa una anchura aproximada de 70 kilómetros. El paisaje geomorfológico corresponde a terrazas de diferente altura y edad, las cuales —a excepción de las más jóvenes— fueron víctimas de la erosión. Los sedimentos depositados de esta manera constituyen un substrato muy importante para la formación del suelo. Las terrazas más antiguas han sido disectadas y moldeadas por la erosión superficial.

Los suelos se caracterizan por poseer una capa orgánica, que consiste por lo general de una red de raíces finas (mantillo) de diferente espesor, mezclada con humus fino y restos de vegetales desmenuzados. Después sigue un horizonte de color amarillo grisáceo, débilmente enraizado. De manera general se trata de suelos extremadamente compactos y, por consiguiente, impermeables, con enraizamiento superficial (*Aeric ochraquox*) llamados por clasificaciones anteriores como suelos del tipo Latosol). Casi siempre se encuentra un substrato compuesto de dos capas: de un lado, un sedimento superficial con un contenido de arcilla de 10% a 25%, la cual aumenta con la profundidad; y de otro, una capa cascajosa pleistocénica subyacente, o bien un pedisedimento o un substrato plioleistoceno muy fino, extremadamente compacto. El material estratificado está usualmente cubierto por un manto arcilloso (mayor de 35% arcilla) y un substrato de baja porosidad (menos de 30% en volumen). Bajo las condiciones climáticas de la región, este tipo de textura y porosidad de los suelos da origen a un régimen de agua del suelo típico de los suelos hidromórficos. Químicamente los suelos son muy pobres; las bases intercambiables sobrepasan apenas los 5 meq/100 g; la capacidad de intercambio catiónico efectiva está entre 2 y 8 meq/100 g y los valores pH oscilan entre 3.3 y 4.

El bosque primario está situado, como se mencionó anteriormente, sobre una terraza plana y es denominado según la clasificación de Beard² como "bosque estacional siempre verde". Se caracteriza en la zona por una altura baja, bajas áreas basales y bajos valores de fitomasa; es rico en palmas. Ostenta solamente dos estratos, que varían entre 7 y 13 m el primero y entre 18 y 25 m el segundo. El último estrato comprende aproximadamente el 60% de todos los árboles. Unos pocos árboles dominantes sobresalen con alturas de hasta 30 m. La altura de las palmas varía entre 5 y 18 m. Se advierte claramente un gran porcentaje de individuos (70%), de clases diamétricas correspondientes a un ámbito de entre 3.5 y 18 cm. La presencia de las palmas se considera como un indicador de tipos pobres de bosques. El bosque contiene un gran número (105 en un cuarto de hectárea) de palmas sin fuste, que no pudieron ser identificadas. Estas constituyen, junto con abundantes lianas, una característica típica de este tipo de bosque.

Diámetros máximos observados en el bosque inventariado, están entre 50 y 65 cm. El número total de árboles mayores de 3,5 cm de diámetro es de alrededor de 1200/ha, a los cuales podrían agregarse 210 árboles muertos. El número de individuos con diámetros supe-

riores a 10 cm es de 720/ha, número mayor que los reportados por Dawkins⁹, (350-550); Richards⁴⁴ (303-617); Foerster¹⁷ (650); Klinge *et al*³² (aprox. 400); y se aproxima mucho a la cifra de Brüning⁵, en la región de Sarawak, sudeste de Asia, para el llamado **bosque enano** (843 individuos). El número de árboles mayores de 30 cm de diámetro es de 49 árboles/ha, cuyo porcentaje hace el 6.8% de todos los árboles con diámetro mayores de 10 cm y menores de 30 cm. La cifra está dentro de los valores mencionados para el bosque tropical húmedo. La dominancia (porcentaje) de las especies del bosque primario de terraza aparecen en el Cuadro 34.

CUADRO 34: Dominancia de especies del bosque primario de terraza Carare-Opón, Colombia.

Especies del Estrato Inferior diámetro < 12.5 cm	% de 77 especies (para 1/4 ha)	
	Anón (<i>Guatteria</i> sp) Anonaceae	26
Maquenque (<i>Oenocarpus</i> sp) Palmae	16	
Mortiflo (<i>Miconia minutiflora</i>) Melastomaceae	12	
Garrapato (<i>Guatteria</i> sp) Anonaceae	6	
Berraquillo (<i>Rinorea</i> sp) Violaceae	5	
Especies del Estrato Superior diámetro > 12.5 cm	Inventario 1970	(1/4 ha) 1971
	%	
Milpesos (<i>Jessenia polycarpa</i>) Palmae	29.0	19.1
Lecheperra (<i>Pseudolmeda rigida</i>) Moraceae	9.7	4.5
Almendrillo ? Leguminosae	5.6	11.0
Escobillo (<i>Xylopia discreta</i>) Anonaceae	5.6	6.4
Sangretoro (<i>Virola sebifera</i> Aubl) Myristicaceae	1.5	5.5
Anime (<i>Protium heptaphyllum</i>) Burseraceae	—	5.5
Fresno (<i>Tapirira guianensis</i>) Anacardiaceae	1.5	4.5
Coco manteco (<i>Eschweillera pittleri</i>) Lecythidaceae	2.4	2.7
Tamarindo (<i>Dialium guianense</i>) Caesalpiniaceae	2.4	1.6
Rayo (<i>Abarema jupumba wild</i>) Britton & kill) Mimosaceae	2.4	1.6
Zapotillo (<i>Leonia triandra</i>) Violaceae	0.8	3.6

FUENTE: Foerster, De las Salas, Khanna¹⁶; De las Salas⁴⁶;

El área basal (de árboles con diámetros superiores a 10 cm) es correlativamente baja (22m²/ha); valores igualmente bajos de 12 m²/ha han sido reportados por Foerster¹⁷, mientras que Vega⁵³ da una cifra promedio de entre 15 m² y 17 m²/ha para el bosque descrito aquí como bosque de terraza. Las características dasométricas del bosque primario se encuentran resumidas en el Cuadro 35.

La contribución de hojarasca y los bioelementos aportados con ella al suelo, así como las reservas minerales contenidas en la vegetación y en el suelo, están reportadas, junto con otros estudios, en capítulos anteriores.

CUADRO 35: Características dasométricas del bosque primario del Carare-Opón, Colombia.

Tipo de bosque a/	N/ha b/ >10 cm.d	G/ha (m ²) >10 cm.d	V/ha (m ³) >30 cm.d	Fitomasa (ton/ha)	Especies dominantes
terrazas miocenas (TIV)	600	32	150 - 180	320	c/
terrazas pleistocenas (TII)	720	22	55 - 74	185	ver cuadro 10.10

a/ Las terrazas miocenas corresponden a sitios bien drenados; las pleistocenas, a sitios con drenaje impedido.

b/ Para el tipo de terrazas miocenas, de 600 árboles por ha, 60% poseen diámetros (a 1.30 m) superiores a 20 cm y 3% superiores a 60 cm. Para el Tipo II, el 20% de 720 individuos arroja diámetros >20 cm. Diámetros mayores a 70 cm no se encontraron.

c/ Sapán (*Clatrotropis brachipetala*); Lecheperra; Perillo negro (*Couma macrocarpa*); (*Carbonero* (*Parkia multijuga*).

FUENTE: Foelster, De las Salas, Khanna¹⁶; De las Salas⁴⁶; von Christen; Smith⁵¹.

ECOSISTEMAS DE SABANA

A. Campo cerrado, Brasil

En el Brasil, las sabanas conocidas como **cerrados** ocupan aproximadamente 120 millones de hectáreas, 90% de las cuales están localizadas en los Estados de Sao Pablo, Minas Gerais, Matto Grosso, Goias y Bahía (Carneiro⁷). El Cerrado se define como una formación arbórea, leñosa y arbustiva, determinada por un clímax edáfico. Los botánicos brasileños, entre ellos Eiten¹¹, reconocen cuatro tipos de vegetación de la variedad: 1) **Campo limpio** o pastizales sin plantas leñosas; 2) **Campo cerrado**, compuesto de una cobertura continua de pastos con matorral y árboles bajos, que cubren menos de un tercio de la superficie; 3) **Cerrado** o paisaje, en el que los árboles tienen menos de siete m de altura y cubren más de un tercio de la superficie; 4) **Cerradao**, que consiste de una cobertura arbórea de entre 7 y 15 m, cerrada o rala, mezclada con gramíneas.

La caracterización climática de este extenso ecosistema se resume en el Cuadro 36.

CUADRO 36: Caracterización climática del Cerrado del Brasil en seis localidades representativas.

Parámetro	Localidad					
	Goiana (PE)	Garanhuns (PE)	Pirassununga (SP)	Santarem (PA)	Pôrto de Galinha (PE)	Humaitá (AM)
Temperatura media anual		20.4 (26)	20.6 (29)			
Precipitación (mm)	2250	1333	1333	2411	2105	2581
Evap. Pot. (mm)	1388	950	1069	1471	1283	1405
Excedentes (mm)	1018	530	320	1125	1003	1240
Deficiencias (mm)	156	147	86	185	181	64
Índice hídrico	67	47	25	69	70	86

PE: Pernambuco

PA: Pará

AM: Amazonas

SP: Sao Pablo

Cifras entre () son temp °C máx y mínima.

FUENTE: Reis de Souza, C.⁴³ (adaptado).

Los balances hídricos, referidos en el Cuadro 36, se calcularon para un límite de 125 mm de retención de agua en el suelo, como capacidad de campo. Las alturas s.n.m. de las localidades tomadas para comparación, oscilan entre 570 y 1000 m. La influencia climoedáfica sobre este ecosistema se discutió en el Cap. 4.

La producción volumétrica, en términos de leña, se presenta en el Cuadro 37.

CUADRO 37: Producción de madera de tres tipos de cerrado y un bosque húmedo.

Tipo de Vegetación	Area basal m ² /ha	Producción (Esteros/ha)			Edad años
		máx.	media	min.	
Cerradinho	5	115	40	14	10
	6	122	51	27	15
	7	128	79	40	20
Cerrado	11	122	94	65	10
	12	134	108	81	15
	13	147	121	96	20
Cerradão	18	225	188	145	15
	19	244	199	155	20
	20	255	210	167	25
Bosque húmedo	21	270	222	174	15
	22	285	234	182	20
	23	300	245	189	25

FUENTE: Carneiro⁷.

La producción volumétrica, como se aprecia en el Cuadro 37, representa un potencial para leña y carbón muy grande, a la vez que el Cerrado constituye el habitat de protección de una rica fauna. Además, es un hecho que esta región será cada vez más ocupada por la agricultura. Carneiro⁷ reporta las siguientes cifras de producción: arroz, 29% de la producción nacional; millo, 17%; frijol, 12%; soya, 11%; mandioca, 8%; oleaginosas, 27%; rebaño bovino, 37%.

Vale la pena destacar, también, que el 25% de las reforestaciones del Brasil (más de un millón de hectáreas) se hallan ubicadas en estos terrenos, mayormente con especies del género *Eucalyptus*, con un incremento promedio de 6 a 12 m³/ha/año.

Las especies arbóreas más representativas del Cerrado son las siguientes (Rizzini⁴⁵): *Anacardium obhoni anum* (Anacardiaceae), *Annona crassifolia* (Anonaceae), *Astronium fraxinifolium* (Anacardiaceae), *Bowdichia virgilioides* (Leguminosae), *Byrsonima sp* (Malpighiaceae), *Caryocar brasiliense* (Cariocaraceae), *Coccoloba cereifera* (Poligonaceae), *Cochlospermum regium* (Cochlospermaceae), *Curatella americana* (Dileniaceae), *Dalbergia violacea* (Papilionaceae), *Enterolobium gummiferum* (Mimosaceae), *Erythrina mulungu* (Papilionaceae), *Fagara rhoifolia* (Rutaceae), *Hymenaea stignocarpa* (Caesalpinaceae), *Luehea paniculata* y *speciosa* (Tiliaceae), *Machaerium opagum* (Papilionaceae), *Mimosa lacifera* (Mimosaceae), *Paliourea rigida* (Rubiaceae), *Psidium sp.* (Mirtaceae), *Pterodon pubescens* (Papilionaceae), *Tapira guianensis* (Anacardiaceae), *Terminalia argentea* (Combretaceae), *Xylopi grandiflora* (Anonaceae).

B. Llanos Orientales, Colombia

El paisaje denominado Llanos Orientales está localizado en la parte Noreste de Colombia, aproximadamente entre las latitudes de 3° y 7° N y al este de la Cordillera de los Andes. Cubre aproximadamente 117 000 km², desde el extremo norte del río Arauca y de la frontera colombo-venezolana, a lo largo de los ríos Ariare y Guaviare, en su extremo sureste, hasta el pie de monte de la cordillera andina, en un trayecto de unos 240 km. El paisaje de los Llanos, en la Región de Sudamérica, se extiende hacia el norte y hacia el este de esta área, hasta la desembocadura del río Orinoco, cubriendo aproximadamente unos 480 000 Km², en Colombia y en Venezuela.

El clima de este ecosistema se caracteriza como sigue: temperatura promedio de 27°C con unas variaciones muy pequeñas, entre el

mes más frío y el mes más caliente. La temperatura máxima diaria alcanza los 32.2°C en marzo; y la mínima diaria, los 21.8°C en diciembre. Alrededor de un 90% de la precipitación total cae en una estación lluviosa, que se extiende unos 11 meses en el sur y unos siete meses y medio en el norte, comenzando entre febrero y abril y terminando entre noviembre y diciembre. La precipitación total anual varía entre 1700 y 2000 mm, aumentando bruscamente cerca del pie de monte de la Cordillera, en Villavicencio, donde alcanza 4000 mm (Blydenstein³).

La región de los llanos de Colombia y Venezuela forma un geosinclinal gigante, entre el escudo de la Guyana y la Cordillera de los Andes. Oppenheim y Hubach, citados por Blydenstein³, estudiaron la geología de los Llanos Orientales y consideraron que esta región se formó de una serie subsecuente de estratos de sedimentos sucesivos, a partir de la erosión activa de la cadena de los Andes. La elevación actual de los llanos de Colombia puede oscilar entre 600 y 200 m s.n.m., con ligeras variaciones en la pendiente, en el Norte y en el Este.

Durante la formación de los Llanos Orientales ocurrieron cambios climáticos, en los cuales se depositaron arenas y loess, transportados por el viento. Goosen²⁰ afirma que el material parental de los suelos de los Llanos Orientales colombianos es loess. Según los estudios de la FAO¹⁴, el material superficial está en estrecha correlación con la granulometría del sedimento rico en limo (loess). Los suelos representativos de esta vasta llanura han sido clasificados por varios autores (FAO¹⁴; Guerrero¹⁹) como Oxisoles, lo cual significa que ostentan la presencia de un horizonte óxico, según la clasificación americana de suelos. Para la llanura inundable, los mismos autores clasifican estos suelos como Oxisoles y como Inceptisoles (*Aquepts*). En general, son suelos químicamente pobres: el pH varía entre 4.1 y 5.1; el calcio más el magnesio intercambiables redondean alrededor del 1.5 meq/100 g; la saturación de aluminio intercambiable es alta (3 meq/100 g), ostentando un nivel de 68% del complejo de intercambio. La capacidad de intercambio catiónico, en suelos de altillanura, oscila entre 5 y 14 eq/100 g para los horizontes superiores y entre 4 y 7 para los horizontes por debajo de 1 m de profundidad (Guerrero¹⁹). Las propiedades físicas de los suelos varían de acuerdo con la posición fisiográfica, por lo que las texturas también oscilan grandemente. Guerrero¹⁹ informa que más del 70% de las partículas de arcilla examinadas corresponden a las arcillas finas. La fracción limo

CUADRO 38: Principales tipos de sabanas en los Llanos Orientales, Colombia.

Tipo	Ocurrencia	Especies		Observaciones
		dominante	asociadas	
Sabana con Bosques relictos	Altillanura	<i>Melinis minutiflora</i>	<i>Homolepis aturensis</i> <i>Panicum pilosum</i> <i>P. versicolor</i>	En la estrib. de la Cordillera pasturas abandonadas, revierten rápidamente a rastrojo.
		Dunas de la Llanura edáfica	<i>Trachypogon ligularis</i> <i>Paspalum carinatum</i>	<i>Cassia tetraphylla</i> <i>Bouadachia virgilioides</i> <i>Miconia</i> sp <i>Axonopus purpusii</i> <i>Leptocoryphium lanatum</i> <i>Paspalum pectinatum</i>
Sabanas secas	Altillanura disectada	<i>Paspalum carinatum</i>	<i>Paspalum pectinatum</i> <i>Trachypogon vestitus</i> <i>Aristida implexa</i> <i>Bouteloua</i> sp.	Suelos erosionados con capa superficial de grava laterítica; ocasionalmente hard-pans descubiertos. Bosques relictos más extendidos.
		Altillanura bien drenada	<i>Trachypogon vestitus</i>	Arbustos esparcidos de <i>Curatella americana</i> L. y <i>Panicum rigidum</i> H.B.K. <i>Byrsonima crassifolia</i> Cassearia <i>sizyphoides</i> H.B.K. Muchos arbustos severamente dañados por el fuego.
	Suelos superf. de terrazas aluv. Altillanura con suelos altos en gravas.	<i>Paspalum pectinatum</i>	<i>Trachypogon vestitus</i> <i>Leptocoryphium lanatum</i>	<i>P. pectinatum</i> en el pie de monte Andino reemplazó al bosque cortado y quemado. Arbustos aislados o en grupo de <i>C. americana</i> , <i>Jacaranda lasyogine</i> y <i>Xilopia aromática</i> .

Continuación Cuadro 38

Tipo	Ocurrencia	Especies		Observaciones
		dominante	asociadas	
Sabanas secas	Suelos recientes de pie de monte y abanicos aluviales	<i>Trachypogon vestitus</i> <i>Axonopus purpusii</i>	<i>Andropogon bicornis</i> <i>Leptocoryphium lanatum</i> <i>Panicum versicolor</i> <i>Cassia flexuosa</i> <i>Melochia polytachya</i>	Matas de monte se caracterizan por su relativa resistencia al fuego. En el pie de monte, los núcleos de matas se desarrollan comenzando con la palma <i>Acromodia</i> sp. A su alrededor crecen unas 30 especies de arbustos; algunos de ellos: <i>Casuarina petraea</i> , <i>Davilla densiflora</i> , <i>Eugenia</i> sp., <i>Rollinia</i> sp., <i>Xyloplea aromatica</i> , <i>Cecropia</i> sp., <i>Genipa americana</i> , <i>Vismia guianensis</i> .
Sabanas húmedas	Elevaciones ligeras mejor drenadas	<i>Trachypogon ligularis</i> <i>Leptocoryphium lanatum</i>	<i>Paspalum pectinatum</i> <i>Andropogon selloanus</i> <i>thrachypogon vestitus</i>	Arbustos comunes: <i>Byrsonima crassifolia</i> , <i>Curatella americana</i> , <i>Pavonia speciosa</i> , <i>Psidium guianense</i>
Sabanas inundables	Sitios húmedos no permanentemente inundados.	<i>Leptocoryphium lanatum</i>	<i>Andropogon hypogynus</i> <i>A. virgatus</i> <i>Axonopus purpusii</i>	En la llanura ebólica no hay especies leñosas. En las Terrazas ocurren manchas de <i>Curatella</i> , <i>Jacランダ</i> y <i>Miconia</i> spp.
Sabanas inundables	Basines de la llanura aluvial de desborde con suelos pesados y drenaje pobre.	<i>Andropogon virgatus</i>	<i>Andropogon bicornis</i> , <i>A. hypogynus</i> hierbas varias y juncos	Este paisaje ocurre a menudo en áreas conocidas como "zurales" (huecos de tamaño y forma irregular, llamados <i>hogwallows</i> por Beard (1953) en Trinidad).

FUENTE: Blyindenstein³, adaptado.

oscila entre el 34 y el 50% y la fracción arena entre el 7% y el 44%. Una descripción detallada de los suelos de los Llanos Orientales se encuentra en FAO¹⁴, Guerrero^{18,19}.

La vegetación es típica de un ecosistema de sabana, muy parecido al descrito para el Cerrado del Brasil, cuya definición florística y ecológica puede adaptarse a este tipo de ecosistema, descrito en la presente sección.

La vegetación de los Llanos fue estudiada exhaustivamente por Blyndestein³, quien la dividió en los siguientes paisajes: a) sabanas con bosques relictos; b) sabana seca; c) sabana húmeda y d) sabana inundable. El Cuadro 38 resume las principales características de estos tipos de sabanas.

La distribución de especies y las características dasométricas de un bosque típico de sabana inundable de dos estratos, se resume en el Cuadro 38.

Las características descritas en el Cuadro 39 corresponden a uno de los tipos de bosque más representativos de la Intendencia del Arauca, cuya superficie boscosa alcanza aproximadamente las 500 000 ha. De éstas, 81 600 fueron levantadas por el inventario forestal (FAO¹⁴; Leal³⁶).

CUADRO 39: Distribución de especies y características dasométricas del bosque de sabana inundable de dos estratos.

No. Especies	Frecuencia %	N/ha > 25 cm.d	V/ha (m ³) > 25 cm.d
3 a/	80 - 100	10	7.7
5 b/	60 - 80	9	7.8
10 c/	40 - 60	11	13.2
23	20 - 40	16	15.1
44	> 20	11	11.7
Total	85	57	55.5

a/ Guamo (*Inga* sp), Guarumo (*Cecropia peltata*)
Laurel (*Nectandra concinna*).

b/ Cuero de Sapo *Symplocos amplifolia*, carutillo (*Genipa americana*) Guayaibo (*Terminalia amazónica*), Pantano (*Hieronyma alchorroides*), Rabo iguano (*Machaerium moritzianum*).

c/ Anime (*Protilum heptaphyllum* March), Charo (*Pseudolmedia laevigata*), Cajeto (*Alchornea* sp), Guácimo (*Luehea* sp), Higuero (*Ficus* sp), Matapalo (*Ficus*, sp), Majagüillo (*Guatteria* sp), Pica pica (*Brosimum* sp), Tórtulo (*Dydinopanax morototoni*), Trompillo (*Guarea trichiliooides*).

FUENTE: FAO¹⁴; Leal³⁶ (adaptado).

ECOSISTEMAS MONTANOS

La Carbonera

Esta región forma parte de la cordillera norte de los Andes venezolanos y está situada dentro de la Cuenca del Río Capazón, Estado de Mérida. El límite inferior de la zona está en 1500 m de altitud y el límite superior en los 2500 m. El ecosistema que se describe a continuación corresponde al bosque de San Eusebio, entre 2200 y 2500 m, situado en la vertiente nororiental del macizo del Tambor.

Este tipo de formación boscosa fue descrita en primera instancia por Lamprecht³⁵, citado por Hetsch y Hoheisel²⁵.

El clima se caracteriza por una precipitación media anual de 1500 mm, con cuatro meses secos, de diciembre a marzo. La temperatura media anual es de 12.6°C, a una altura de 2300 m, con máximas de 22°C y mínimas de 5°C. La humedad relativa promedio anual es de 89%. Los mismos autores describen la morfología del lugar como sigue: la parte inferior del bosque es una formación de arcilla esquistosa, la cual se meteoriza rápidamente hacia una arcilla de tipo limoso. A continuación, se presenta una franja delgada de la formación **mitojuan**, del cretáceo, rica en areniscas. Estas areniscas se componen en su mayoría de material cuarcítico. En la superficie, se aprecia un sedimento de ladera de una profundidad variable, de entre 40 y 80 cm, que presenta un contenido de arcilla de entre 25% y 50%. Los suelos son ricos en humus y pertenecen al grupo de los Inceptisoles (*Oxichumitropept*, *Aquic humitropept*, *Typic Tropaquept*). Presentan generalmente pH ácidos (3.5 a 3.8), altos contenidos de carbono en los horizontes superiores (8%), relaciones C-N igualmente altas (12-16) y una saturación de bases relativamente alta (13.6 a 44%). Los colores de los primeros horizontes oscilan del pardo oscuro al pardo amarillento oscuro, con estructuras poliédricas muy bien desarrolladas; además presentan una cantidad grande de raíces finas en el horizonte orgánico mineral (Hetsch²⁵). Las características dasométricas del ecosistema se resumen en el Cuadro 40, según tres autores.

La gran variación en las características del bosque, no apreciables en el cuadro, son atribuibles a diferencias climáticas, a los suelos y ocasionalmente a explotaciones forestales (Veillon⁵⁴). Este mismo autor calculó la masa forestal por hectárea de 11 parcelas de amplio récord, las cuales arrojaron los siguientes resultados: el crecimiento

medio anual por hectárea es de 0.1 a 0.28 cm en diámetro, 0.28 a 0.71 m² en área basal y 2 a 7 m³ en volumen de fustes, es decir, de 0.8 a 2% del volumen total de los fustes.

Las especies forestales más importantes son (Veillon⁵⁴): *Alchornea grandiflora*; *Cordia caracasana*; *Guarea* y *Trichilia* spp; *Ocotea* y *Persea* spp; *Sapium stylare*; *Vochysia duquei*; *Virola sebifera*; *Richeiria grandis*; *Chrysophyllum* sp y *Podocarpus rospigliosii*. Las especies anteriores presentan una dominancia (% del área basal) entre 35 y 57%, según levantamientos en seis sitios, realizados por Hetsch y Hoheisel²⁵. En algunos tipos de bosque, el pino laso (*Podocarpus rospigliosii*) representa hasta un 30% de la dominancia total.

Este es uno de los ecosistemas de altura más importantes y constituye una reserva de unas 600 hectáreas, cuya preservación está a cargo de la Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Los datos sobre el funcionamiento (balance y ciclo de nutrimentos, fitomasa, reservas minerales, translocación de bioelementos) del ecosistema de San Eusebio se han reseñado en capítulos anteriores.

CUADRO 40: Características dasométricas del Bosque de San Eusebio, Andes venezolanos.

No. Parcelas	No. esp./ parc. (ha)	Tamaño parc.	N/ha > 10 cm.d	G/ha m ²	V/ha m ³	crecimiento/año		
						d cm	G/ha m ²	V/ha m ³
17 (Hetsch, Hoheisel)	29	0.22	901	36.1	389			
6 (Veillón)		0.25	743	31.4	286	0.16	0.37	2.37

FUENTE: Hetsch y Hoheisel²⁵, Veillón⁵⁴. (Adaptado). Datos reproducidos con permiso del autor.

OTROS ECOSISTEMAS

La Selva Central del Perú (Malleux³⁸ O.J.; Universidad Nacional Agraria La Molina⁵²).

La región conocida como Selva Central se encuentra ubicada en la parte central y oriental del territorio peruano, entre los paralelos 8° y 12° de latitud sur y los meridianos 70°30' y 75°32'. Comprende la provincia de Oxapampa, del Departamento de Paso; las provin-

cias de Satipo y Chanchamayo, del Departamento de Junín; los distritos de Honoría y Puerto Inca, de la provincia de Pachitea, Departamento de Huánuco; las provincias de Atalaya, Purús y parte de la provincia de Coronel Portillo, del Departamento de Ucayali.

La superficie total de la región se estima en 12.4 millones de hectáreas, de las cuales más del 50% presentan condiciones favorables para el aprovechamiento forestal, y las restantes están divididas en tierras de aptitud agrícola, pecuaria y de protección.

Estructura y composición

Las condiciones fisiográficas, florísticas, edáficas y socioeconómicas permiten dividir esta región natural en lo que se ha denominado Selva Alta y Selva Baja. La Selva Alta es la faja comprendida entre 3800 y 4000 m s.n.m. de la vertiente oriental de los Andes peruanos (límite con la Sierra), hasta los 600 m s.n.m. Dentro de esta región, se suele llamar **ceja de selva** al cinturón situado a más de 2500 m; esta zona ha estado sujeta a deforestación, quemas y sobrepastoreo. A continuación, sigue el extenso llano amazónico, Selva Baja. Comparativamente es no sólo la región menos poblada de la Selva, sino la zona de menor población a nivel nacional, conservando por tanto en términos generales sus características originales.

La región de la Selva, según el mapa forestal del Perú (1975), comprende bosques productivos homogéneos, entre los cuales se destacan las asociaciones de palmas *Mauritia spp.* y *Euterpe spp.* en Selva Baja y de *Podocarpus sp.*, única conífera nativa, en Selva Alta. Bosques productivos heterogéneos, de diferentes calidades, cubren la mayor extensión de la selva. De acuerdo con la fisiografía y el volumen maderable, se han dividido en **bosques aluviales** y **bosques de colinas**. Cada uno de estos tipos se subdivide en tres categorías.

La estructura de los bosques de la Selva Central está compuesta por dos y hasta tres estratos bien definidos, alcanzando el superior alturas de entre 35 y 40 metros.

La composición florística es muy heterogénea. Abundan, además de árboles y arbustos, palmas, helechos, lianas, bejucos y epífitas. Los géneros de árboles maderables más abundantes corresponden a los siguientes: *Virola*, *Lucuma*, *Iryanthera*, *Aniba*, *Protium*, *Ormosia*, *Guarea*, *Simarouba*, *Dyalanthera*, *Ceiba*, *Cedrelinga* y *Clarisia*.

Existen además comunidades homogéneas de palmas (*Mauritia vinifera* y *M. flexuosa*), denominadas **aguajales**, que abarcan grandes superficies (un millón de hectáreas) de suelos hidromórficos, inundados permanentemente.

Volúmenes maderables

La distribución de árboles, según categorías diamétricas, así como los volúmenes maderables por tipo de bosque, se resumen a continuación:

CUADRO 41: Volúmenes maderables por tipo de bosque y categoría diamétrica en la Selva Central del Perú.

Tipos de Bosque	Categorías Diamétricas (cm) a/			Total
	10 - 25	25 - 40	> 40	
Aluvial Clase I	122/47	72/43	34/92	228/182
Aluvial Clase II	142/7	26/6	9/21	149/34
Aluvial Clase III	150	(69) 39	31	220
Colinas Clase I	144/56	79/53	40/108	264/217
Colinas Clase II	161/50	80/48	40/114	282/212
Colinas Clase III	162/51	81/47	38/80	281/178

a/ La cifra de la izquierda corresponde al número de árboles, la de la derecha al volumen en m³. Ambas cifras expresan unidades por hectárea. La cifra entre paréntesis corresponde al volumen promedio por hectárea, para el tipo de bosque en cuestión.

FUENTE: Universidad Nacional Agraria La Molina⁵², adaptado por de las Salas⁴⁷.

Importancia

Vale la pena anotar que el sector forestal, en la región de la Selva Central, es uno de los más importantes dentro de los productivos. Sin embargo, el proceso de ocupación de la tierra ha sido un factor determinante del deficiente aprovechamiento del bosque natural y de la pérdida de madera en las áreas de agricultura migratoria. Las magnitudes que asume el problema de la tenencia de la tierra son de relevante significación, como factores limitativos para la planificación del desarrollo de la región. El problema de la agricultura migratoria se trata en el Cap. 11.

Suelos

Los suelos de la Selva Baja están constituidos por sedimentos no consolidados del terciario y pleistoceno, en los cuales predominan las

arcillas caoliníticas y las arenas de naturaleza cuarzosa (Zamora⁵⁵). Fisiográficamente, se trata de un paisaje de penillanuras inferiores a 300 m, con grados diversos de disectación, debido a un proceso erosivo continuo.

El grupo de suelos más representativo, en el ámbito de la Selva Baja peruana, es el de los Ultisoles. Exhiben un paisaje de ondulado a colinado, con pendientes de entre 3 y 50%. Soportan bosques maduros de diferente volumen y composición. Presenta las características químicas típicas de suelos antiguos (Zamora⁵⁵): pH 4 - 5, saturación de bases inferior a 30%, capacidad de intercambio de cationes por debajo de 10 meq/100 g, alta saturación de aluminio (+ 60%), muy bajo contenido de fósforo (menor de 10 ppm).

Los suelos de la Selva Alta están asociados con laderas empinadas y valles amplios. Constituyen grupos aluviales, coluvio-aluviales y residuales, desarrollados de Granitos, Lutitas, Areniscas y materiales cuarzosos. Las características más sobresalientes de estos suelos son las siguientes (Carlos Robles, ONERN, Lima; comunicación personal): profundidad variable (25 a 140 cm); drenaje moderado a bueno; texturas dominantes franco, franco arenoso y franco arcilloso; reacción ácida a neutra (pH 5 a 7); contenido de materia orgánica medio a alto en el horizonte superior; fertilidad media a alta, dependiendo del material de origen y de las prácticas agronómicas.

Los suelos de este paisaje han sufrido una intensa erosión por causa de la deforestación.

RESUMEN

1. Se describen las características más sobresalientes de los ecosistemas forestales de América Tropical, destacando los bienes y servicios, los valores culturales, la vegetación, los suelos y la fauna.
2. Se describen sintéticamente algunos ecosistemas, resaltando, entre otras, las siguientes características: estructura y composición florística, fisiografía, número de árboles por hectárea, Área Basal y volumen. Se anotan también las propiedades de los suelos. Los ecosistemas descritos son: Zonas Bajas: Amazonía Central, Brasil; San Carlos de Río Negro, Amazonas, Venezuela; Amazonía colombiana; bosque húmedo del Carare-Opón, Colombia. Ecosistemas de Sabana: Campo Cerrado, Brasil; Llanos Orien-

tales, Colombia. Ecosistemas Montanos: La Carbonera, Venezuela. Se describe, finalmente, el ecosistema de la Selva Central del Perú.

3. Se destacan las correlaciones marcadas entre el tipo de vegetación y el suelo, en los ecosistemas del Amazonas venezolano, Campo Cerrado, Brasil, y los Llanos Orientales y el Carare-Opón, ambos de Colombia. Para el caso venezolano, se distinguen la **caatinga alta y baja**, influídas por un gradiente hidroedáfico. Esta influencia se manifiesta en una masa forestal de mayor diámetro (41.7 cm) y altura (25.4 m) en el paisaje de caatinga alta. Estos mismos parámetros son de 11.8 cm (diámetro) y 11 m (altura) para la caatinga baja. Para el Carare-Opón, el drenaje influye tanto en el volumen como en la fitomasa del bosque primario. En las terrazas miocenas (bien drenadas), el volumen (150-180 m³/ha) y la fitomasa (320 ton/ha) son mucho mayores que en el paisaje de terrazas pleistocenas (drenaje impedido), cuyos valores de volumen y fitomasa son del orden de 55-74 m³/ha y 185 ton/ha, respectivamente.

4. El Campo Cerrado del Brasil es el ecosistema de sabana más extenso de América Tropical y abarca 120 millones de hectáreas. Se define como una formación arbórea, leñosa y arbustiva, determinada por el clímax edáfico. Los botánicos reconocen cuatro tipos de vegetación de "cerrado": 1) **campo limpio** o pastizales sin plantas leñosas; 2) **campo cerrado**, compuesto de una cobertura continua de pastos, con matorral y árboles bajos; 3) **Cerrado** o paisaje, con árboles menores de siete metros de altura; 4) **cerrado**, con una cobertura arbórea de entre 7 y 15 m, cerrada o rala, mezclada con gramíneas.
El ecosistema del cerrado presenta temperaturas medias anuales de 20.5°C, con mínimas de 12°C y máximas de 29°C. La precipitación oscila entre 1300 y 2580 mm/año.
La producción volumétrica de leña y carbón representa un gran potencial para satisfacer las necesidades energéticas de la población. La región es además una gran despensa de producción agrícola. Alberga también el 25% (un millón de hectáreas) de las reforestaciones del Brasil.

5. Los ecosistemas de zonas bajas se caracterizan en general por poseer suelos pobres (Ultisoles, Oxisoles, Spodosoles), aunque en la Amazonía colombiana hacen su presencia también los Inceptisoles. Los Ultisoles y Oxisoles representan el 82% (938

millones de ha) de los suelos del trópico americano, mientras que los suelos moderadamente fértiles, bien drenados, hacen solamente un 7% (44 millones de ha).

6. Las estructuras vegetales de los ecosistemas de trópico bajo no son tan exuberantes como se cree popularmente, lo cual da crédito a la opinión de Schulz⁵⁹, en el sentido de que las selvas neotropicales están en permanente renovación y por tal razón no alcanzan diámetros gigantescos. Por otra parte, las características de los suelos y el reciclaje rápido de nutrimentos ponen en evidencia la fragilidad de estos ecosistemas.

BIBLIOGRAFIA

1. ALVIM, P. DE T.; ARAUJO, W.A. 1952. El suelo como factor ecológico en el desarrollo de la vegetación en el centro-oeste del Brasil. *Turrialba* 2(4):153-160 (no consultado; citado por Lopes y Cox, 1977).
2. BEARD, J.S. 1955. The classification of tropical American vegetation types. *Ecology* 36:89-100.
3. BLYNDENSTEIN, J. 1967. Tropical savanna vegetation of the Llanos Orientales of Colombia. *Ecology* 48(1):1-15.
4. BRUNIG, E.F.; KLINGE, H. 1976. Comparison of the phytomass structure of equatorial "rain forest" in central Amazonas, Brazil, and in Sarawak, Borneo. *Gardens Bulletin* (Singapore XX IX), 81-101.
5. _____. 1968. Der heidewald von Sarawak and Brunei. *Mittl. d. Bundesforschungsanst. f. F. und Holzw.* Reinbek, Hamburg. No. 68. 151 p.
6. BUDOWSKI, G. 1956. Tropical savannas; a sequence of forest felling and repeated burnings. *Turrialba* 6(1-2):23-33.
7. CARNEIRO C.M.R. 1982. A vegetação dos cerrados: análise e perspectivas. EMBRAPA. Boletín Técnico No. 7. 6-17.
8. _____. 1958. The management of natural tropical high-forest with especial reference to Uganda. Oxford. Imp. For. Inst. Paper No. 34. 155 p.

9. DAWKINS, H.C. 1964. Productivity of tropical forests and their ultimate value to man. p. 178-182. In *The ecology of man in the tropical environment*. IUCN Publ. New Series No. 4 IUCN. Morges, Switzerland.
10. DOUROJEANNI, M.J. 1982. Estudio de caso de manejo ambiental: la Selva Central del Perú. Informe sobre la fauna silvestre. PNUMA/OEA/ONERN. Lima, Perú. 61 p. (mimeo).
11. EITEN, G. 1972. The cerrado vegetation of Brazil. *Bot. Rev.* 38(2):201-341.
12. ELLENBERG, H.; MUELLER-DOMBOIS, D. 1967. Tentative physiognomic ecological classification of plant formations of the earth. *Ber. Geobot. Forsch. Inst. Rubel, Suiza*, 37:21-55.
13. FAO, 1975. Soil map of the world. Vol. IV. South America. París. UNESCO.
14. FAO. 1965. Reconocimiento edafológico de los Llanos Orientales, Colombia. 4 Vol. FAO/SF: 11/COL.
15. FITTKAU, E.J.; KLINGE, H. 1973. On biomass and trophic structure of the Central Amazonian rain forest ecosystem. *Biotropica* 5(2):2-14.
16. FOELSTER, H.; DE LAS SALAS, G.; KHANNA, P. 1976. A tropical evergreen forest site with perched water table, Magdalena Valley, Colombia; Biomass and bioelement inventory of primary and secondary vegetation. *Oecologia Plantarum* 11(4):297-320.
17. FOERSTER, M. 1973. Strukturanalyse eines tropischen regenwaldes im Kolumbien. *Allg. Forst-und Jagdzeitung* 143(5):99-108.
18. GUERRERO, R. 1971. Soils of the Colombian Llanos Orientales; composition and classification of selected soil profiles. Ph.D. Thesis. North. Carolina State University. Raleigh (unpublished).

19. GUERRERO, R. 1974. Suelos del Oriente de Colombia. p. 61-92. In Bornemisza E. y Alvarado A. (eds.). Manejo de suelos en la América tropical. Seminario sobre manejo de suelos y el proceso de desarrollo en América tropical. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia. 582 p.
20. GOOSEN, D. 1971. Physiography and soils of the Llanos Orientales, Colombia. International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences I.T.C. Delft. The Netherlands.
21. GOODLAND, R. 1971. Oligotrofismo e aluminio no cerrado. p. 44-60. In Ferri M.G. (coord.). III Simposio sobre o cerrado. São Paulo, Brasil. Editora Edgar Blücher Ltda. 239 p.
22. _____; POLLARD, R. 1972. The Brazilian cerrado vegetation: a fertility gradient. *Ecology* 61(1):219-225 (citado por Lopes y Cox, 1977).
23. HERRERA, R. 1977. Soil and terrain conditions in the international Amazon Project at San Carlos de Río Negro, Venezuela; correlation with vegetation types. Trans. Int. MAB-IUFRO Workshop. Hamburg-Reinbek, p. 1982-88.
24. HETSCH, W.; HOHEISEL, H. 1976. Die Beziehung von niederschlag und bodenbildung in der Andenkordillere Venezuelas. Dissertation. Univ. Göttingen. 167 p.
25. _____. 1976. Standorts-und vegetationsgliederung in einem tropischen nebelwald. *Allg. Forst U.J. Ztg.* 147(10/11):200-209.
26. HOLDRIDGE, L.R. 1978. Ecología basada en zonas de vida. Traducido por Humberto Jiménez Saa. San José, Costa Rica. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA). Serie Libros y Materiales Educativos No. 34. 216 p.
27. _____; POVEDA, L.J.; 1975. Arboles de Costa Rica V.1. San José, Artes Gráficas de Centroamérica. 546 p.

28. HUECK, K. 1978. Los bosques de Sudamérica; ecología, composición e importancia económica. Traducción del alemán por R. Brun. Eschborn, Alemania Federal. Soc. Alemana de Cooperación Técnica, GTZ, 476 p.
29. INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS (IICA). 1976. Simposio internacional sobre plantas de interés económico de la flora amazónica. IICA-TROPICOS. Informes de Conferencias, cursos y reuniones No. 93. Turrialba, Costa Rica. 292 p.
30. KLINGE, H. 1965. Podzol soils in the Amazon Basin. *Journal of Soil Science* 16:95-103.
31. _____; FITTKAU, E.J. 1972. Filterfunktionen im oekosystem des zentralamazonischen regen regenwaldes. *Mitt, deutsch. bodenk. Ges. Göttingen*. 16:130-135.
32. _____; RODRIGUEZ, W.A.; BRUNIG, E.F.; FITTKAU, E.J. 1975. Biomass and structure in a Central Amazonian rain forest. p. 115-222. In Medina y Golley (eds.). *Ecological Studies II: Tropical Ecological Systems*. New York & Berlin. Springer.
33. _____. 1978. Studies on the ecology of Amazon caatinga forest in southern Venezuela, II: biomass dominance of selected tree species in the Amazon caatinga near San Carlos de Río Negro. *Acta Científica Venezolana*. 29(4):258-262.
34. _____. MEDINA, E. 1979. Río Negro Caatingas and Campiñas, Amazonas States of Venezuela and Brazil. In R.L. Specht (ed.). *Heathlands and related shrublands of the World. Descriptive Studies*. Chapter 22, p. 483-488. Amsterdam. Elsevier Scientific Publishing Company.
35. LAMPRECHT, H. 1958. Der gebirgs. Nebelwald der venezolanischen Anden. *Schweiz. Zeitschr. f. Forstwesen* 2 (original no consultado; citado por Hetsch y Hoheisel, 1976).
36. LEAL, C.J. 1964. Estudio basado en un inventario combinado con fotointerpretación de los tipos de bosque de la región forestal de la Intendencia de Arauca, Colombia. Tesis Ing. Forestal. Universidad Distrital "F.J.C.". Bogotá, Colombia. 62 p. (no publicado).

37. LOPES, A.S.; COX, F.R. 1977. Cerrado vegetation in Brazil: an edaphic gradient. *Agronomy Journal* 69:828-831.
38. MALLEUX, O.J. 1975. Mapa forestal del Perú. Memoria explicativa. Universidad Nacional Agraria La Molina. 161 p.
39. NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. 1975. Underexploited tropical plants with promising economic value. Washington, D.C. 188 p.
40. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1982. Ecological aspects of development in the humid tropics. Chapter 2: p. 25-63. Washington, D.C. National Academy Press.
41. PROYECTO RADARGRAMETRICO AMAZONAS. 1979. La Amazonía Colombiana y sus recursos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá. Talleres gráficos Italgraf, S.A. Vol. I. 546 p.
42. RANZANI, G. 1971. Solos do cerrado no Brasil. p. 26-43. In M.G. Ferri (coord.). III Simposio sobre o cerrado. São Paulo, Brasil. Editora Edgar Blücher Ltda. 239 p.
43. REIS DE SOUZA, C.A. 1971. Climatología dos cerrados. p. 15-25. In Ferri, M.G. (coord.). III Simposio sobre o cerrado. São Paulo, Brasil. Editora Edgar Blücher Ltda. 239 p.
44. RICHARDS, P.W. 1966. The tropical rain forest. 4th. edition. Cambridge University Press. 450 p.
45. RIZZINI, C.T. 1971. Sobre as principais unidades de dispersão do cerrado. p. 117-132. In Ferri M. (Coord.). III Simposio sobre sobre o cerrado. São Paulo. Editora Edgar Blücher Ltda. 239 p.
46. SALAS, G. DE LAS. 1978. El ecosistema forestal Carare-Opón. CONIF. Serie técnica No. 8. 87 p.
47. _____. 1982. Estudio de caso de manejo ambiental. La Selva Central del Perú. 83 p. (no publicado).

48. SANCHEZ, P.A.; COCHRANE, T.T. 1980. Soil constraints in relation to major farming systems in Tropical America. p. 107-139. In *Priorities for alleviating soil-related constraints to food production in the tropics*. International Rice Research Institute. Los Baños, Philippines.
49. SARMIENTO, G.; MONASTERIO, M. 1975. A critical consideration of the environmental conditions associated with the occurrence of savanna ecosystems in tropical America. p. 223-250. In Golley F.B. y Medina E. (eds.). *Tropical Ecological Systems-Trends in territorial and aquatic research*. Springer. New York, Heidelberg, Berlín.
50. SCHULZ, J.P. 1960. *Ecological studies on rain forest in northern Suriname*. Amsterdam. North Holland Publishing Co. 267 p.
51. SMIT, G. 1962. *Inventario de bosques con fotografías aéreas de la región Carare-Opón, Santander (Colombia)*. Bogotá. Universidad Distrital "F.J.C.", 49 p. (mimeo).
52. UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA. 1979. *Evaluación de los recursos forestales del trópico peruano*. Centro de Estudios de Proyectos de Inversión y Desarrollo, CEPID. Lima, Perú. 119 más anexos.
53. VEGA, C.L. 1968. *La estructura y composición de los bosques tropicales del Carare, Colombia*. Turrialba 19(4):416-436.
54. VEILLON, J.P. *et al.* 1983. *El crecimiento de algunos bosques naturales de Venezuela en relación con los parámetros del medio ambiente*. Universidad de los Andes. Instituto de Silvicultura. Mérida, Venezuela. 122 p.
55. ZAMORA, J. 1974. *Los suelos de las tierras bajas del Perú*. Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales, ONERN. Lima, Perú. 23 p.; también en: Bornemisza E. y Alvarado A. (eds.). *Manejo de suelos en América Tropical*. Seminario desarrollado en el Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia. Febrero 1974, p. 45-60.

PARTE III

**EL SUELO
COMO COMPONENTE
DEL SISTEMA
DE PRODUCCION**

AGRICULTURA DE BAJA TECNOLOGIA: AGRICULTURA MIGRATORIA Y DE LADERA

Sistemas de tumba - roza - quema

La literatura sobre este tema es muy extensa. Existen publicaciones clásicas que deben ser consultadas por los estudiosos. Entre ellas, merecen mención los trabajos de Nye y Greenland²², Bartholomew, Meyer y Laudelout¹, Watters y Concklin⁶.

Descripciones del sistema se encuentran también en muchos trabajos. La más reciente y completa descripción del manejo del suelo, en áreas de agricultura nómada, ha sido realizada por Sánchez³¹ en su excelente obra *Suelos del trópico, características y manejo*, a la cual se remite a todos los estudiantes de suelos de América Tropical.

Esta práctica de uso del suelo tiene por lo menos diez acepciones, según el lugar: **agricultura de pancoger, roza, monte, rastrojo, conuco, chaco, barbecho**, en América del Sur y Central. En México se le denomina **milpa**. Sánchez³¹ informa sobre los siguientes nombres pa-

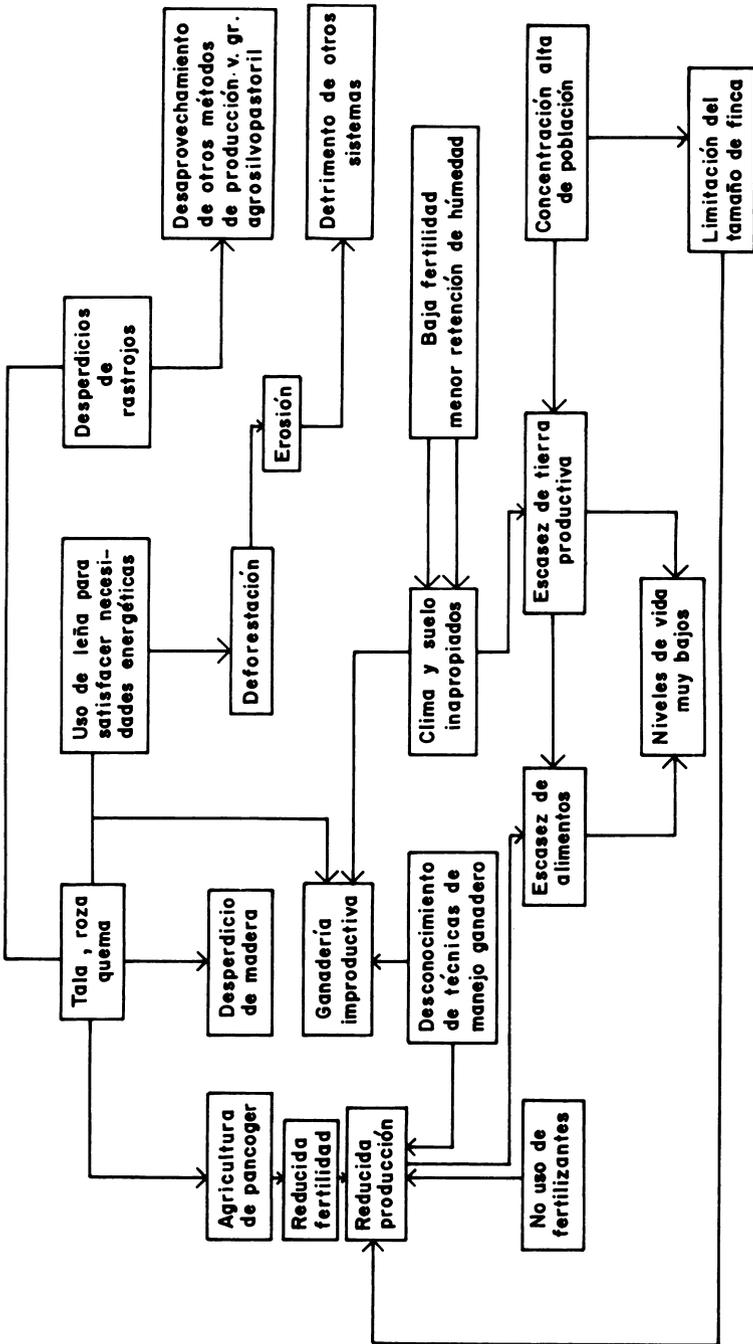


FIG. 26. Caracterización de la producción en sistemas de tumba-roza-quema.

ra otras latitudes: **kaingin** en las Filipinas, **chena** en Sri Lanka, **lua** en Vietnam, **ray** en Laos y **ladang** en Indonesia. En inglés se identifica como **slash and burn agriculture**, **bush fallow**, **shifting agriculture** y **swidden farming**. Para América Tropical, Sánchez³³ realizó una revisión de literatura exhaustiva. Valiosa información también ha sido aportada por la FAO^{10,11,12}. La Fig. 27 es una representación esquemática de este sistema de producción y sus consecuencias sobre el suelo.

La agricultura de tumba-roza-quema era considerada hasta hace poco como un sistema detrimental de uso del suelo. Sin embargo, los investigadores empezaron a preguntarse si en realidad era tan malo el sistema, por qué es la práctica predominante en 3600 millones de hectáreas (aproximadamente el 30% de los suelos explotables del mundo) y el medio de subsistencia de más de 250 millones de habitantes (Hauck, citado por Sánchez³¹). Hasta hace unos años nadie se atrevía a defender este sistema, que era (y aún es) considerado como uno de los más degradantes del suelo. Hoy se cuenta con estudios que demuestran (al menos localmente) que la agricultura migratoria no es la "fuente de todos los males del agricultor" (ver, por ejemplo, Sánchez³⁵; Sánchez *et al*³²). Watters opina que este sistema, como cualquier otro, funciona a través de ciertos insumos de energía o materia (trabajo, capital, materia orgánica y agua) y con recursos finitos (superficie, suelos, vegetación y agua), los cuales deben ser manejados para aumentar el rendimiento de las cosechas.

Se estima en casi 100 millones de hectáreas la superficie boscosa convertida en pastizales y cultivos de pancoger en América Tropical (FAO).

Efectos de la tala y la quema

Las consecuencias de la tumba del bosque tropical, la quema y la posterior utilización del suelo para cultivos en las áreas tropicales húmedas han sido revisadas por muchos investigadores (Dassman *et al*⁷; Brüinig³; Rehm²⁸; De las Salas y Foelster³⁰; Sánchez³¹; Sánchez *et al*³²; Okigbo y Lal²⁴; Lal y Cummings¹⁹; Ewel *et al*⁹; Laudelout²⁰, Nye y Grenland²²; Brinkman y Nascimento²). Las principales conclusiones obtenidas por los investigadores anteriores se pueden resumir en las siguientes:

- rápida descomposición de la materia orgánica, por actividad de los microorganismos (ver Cap. 8);
- pérdida de materia orgánica muy rápida, inmediatamente después de la quema;

pérdida de considerables cantidades de nutrimentos o bioelementos (volatilización de algunos de ellos como azufre, especialmente, y nitrógeno, en menor cantidad);

un lavado extenso de nutrimentos en todo el perfil del suelo;

pérdida por lixiviación de cantidades apreciables de nutrimentos, temporalmente disponibles, los cuales no son tomados rápidamente por las cosechas que se cultivan después de la tala y la quema;

una reducción drástica en la disponibilidad de ciertos nutrimentos, debido a su fijación (especialmente el fósforo);

pérdida de nutrimentos por supresión de la biomasa existente antes de la quema, lo cual minimiza el rendimiento sostenido de una producción agrícola a largo plazo;

problemas de un crecimiento excesivo de malezas.

Foelster (comunicación personal) encontró que la existencia de grandes superficies, a manera de cinturones sin vegetación (calveros) en el área del Amazonas venezolano (hoya del Caciquiare-Río Negro), era causada por cantidades exageradamente altas de ión aluminio, después de haber tumbado y quemado el bosque dentro del sistema de agricultura migratoria.

Otros cambios observados en los trópicos se refieren a la temperatura del ambiente y del suelo. En Africa, por ejemplo, Lal y Cumings¹⁹ encontraron que la máxima temperatura del suelo a un centímetro de profundidad, después de la quema, fue de 74 grados centígrados. Resultados similares han sido reportados por otros autores en los trópicos americanos (Ewel *et al*⁹; Sánchez³¹). Estas altas temperaturas del suelo influyen poderosamente en un cambio momentáneo de la microfauna del suelo. Se ha observado, también, que algunas semillas de especies características invasoras son muy resistentes a altas temperaturas, por lo que permanecen en estado de latencia y, cuando comienza el rebrote del rastrojo secundario, aparecen en forma muy agresiva.

Tales especies corresponden a la mayoría de las gramíneas y a especies forestales características de la sucesión secundaria temprana, tales como chaparro (*Curatella americana*). Por otra parte, Lal *et al*, citado por Sánchez³¹, informaron que ciertos suelos de Nigeria (Alfisoles) que tenían capas arables arenosas fueron desmontados y reaccionaron, formando una capa costrosa en la superficie, que dio

por resultado serias pérdidas por erosión. Fenómenos parecidos han sido reportados por Foelster¹⁴. Se ha argumentado también (Budowski⁴), que la deforestación del bosque tropical y las quemadas repetidas, causan cambios importantes en el suelo, especialmente físicos, y que ésta es la causa de la existencia de extensas costras lateríticas encontradas en ambos hemisferios. Esto explicaría la presencia muy extendida de sabanas de origen antrópico en el trópico húmedo americano. Tal concepto ha sido rebatido recientemente (Sánchez y Buol³⁶; Sánchez³¹). Los citados autores afirman que la formación de la llamada coraza laterítica del suelo ocurre en pequeñas extensiones de los trópicos y que, cuando se forma, aparece a profundidades mayores de un metro; por lo que, de utilizarse la tierra para cultivos, no constituye un impedimento físico. Además, los autores afirman que, en estado de afloración, sirve en muchas zonas tropicales como material de recebo para la construcción de caminos. Este último fenómeno ha sido también observado por el autor en los suelos de Suriname. Cochrane y Sánchez⁵ comentan que muchos subsuelos, pobremente drenados de la Amazonía, tienen colores mateados que parecen plintita, pero en realidad son mezclas de minerales arcillosos de tipo 1:1 y 2:1.

Cambios en las propiedades físicas del suelo

Los principales cambios que se suceden en las propiedades físicas del suelo por la práctica de la agricultura migratoria en el trópico, se refieren a dos de sus más importantes características: la estructura y, por consiguiente, su capacidad de infiltración. Contrariamente a lo que se piensa, en el sentido de que la tumba y posterior quema del bosque natural en los trópicos deteriora en todos los casos las propiedades físicas del suelo, este efecto detrimental depende sin embargo de las propiedades del suelo mismo. Sánchez³¹ informa sobre observaciones de Popenoe en suelos volcánicos de Guatemala, que fueron sometidos a la tala del bosque. Este autor encontró que, en los primeros 10 centímetros del suelo, la densidad aparente en un caso aumentó de 0.56 a 0.66 grm/cm³ y, en otra observación, disminuyó de 0.74 a 0.70 grms/cm³, después de tres a cinco años de rebrote del bosque primario (regeneración natural).

En suelos Oxisoles de Colombia, Foelster y De las Salas¹⁵ compararon una sabana de 16 años, que había sido pastoreada y previamente quemada, con un bosque primario en el mismo sitio y comprobaron que se evidenció una mayor saturación en la sabana. La

diferencia de saturación varió entre 0.15 y 0.36 unidades de pF (es decir, 3 a 20 mm de reserva de agua para el caso de la investigación). Estas diferencias tal vez no sean significativas para el crecimiento de las plantas; pero evidencian un efecto del manejo del suelo en áreas de agricultura migratoria, que puede reflejarse desfavorablemente sobre la capacidad de infiltración del suelo superficial. En suelos con drenaje impedido (*Aeric Ocracuoxx*), correspondientes a la investigación desarrollada en Colombia, es evidente que las pérdidas de agua superficial en el pastizal influyeron el balance hídrico negativamente. En suelos de infiltraciones excesivas, como algunos de los trópicos (Alfisolos, Oxisol), los cambios que ocurren en su estructura pueden ser favorables, como ocurre en el ejemplo citado por Sánchez³¹ en un Oxisol del Brasil, en donde se observó una marcada disminución en la tasa de infiltración —de 82 a 12 centímetros por hora— cuando se taló el bosque original y la tierra se cultivó durante 15 años.

Cambios en la materia orgánica y nitrógeno orgánico del suelo

Sánchez³¹ comenta que, aunque la quema volatiliza la mayor parte del carbono, del azufre y del nitrógeno presentes en la vegetación, tiene pocos efectos sobre la materia orgánica del suelo. Su afirmación parece confirmarse con algunos estudios recientes. Ewel⁹ y colaboradores comprobaron, en un bosque húmedo de Costa Rica, que la quema sólo volatilizó el 22% del nitrógeno contenido en la vegetación, por lo que concluyeron que la quema en sí no es un tratamiento que deteriora el sitio, sobre todo si éste es rico en materia orgánica. Por otra parte, el nitrógeno y el carbono orgánico de la capa arable disminuyen en forma drástica, inmediatamente después de la quema, pero luego recobran su equilibrio en los diferentes estados de sucesión natural. Tales tendencias fueron observadas por las Salas y Foelster³⁰ en Colombia y por Popenoe (citado por Sánchez³¹) en Guatemala. La Fig. 28 ilustra la situación. La relación C-N de la capa orgánica, en el caso colombiano, aumentó de 8 a 46 en cinco meses, lo cual sugiere que las pérdidas volátiles eran ricas en N. Sánchez³⁵ afirma que el contenido de arcilla del suelo superior atenúa las pérdidas de materia orgánica. Turenne, citado por Cochrane y Sánchez⁵, trabajando con barbechos de edad conocida, sobre Oxisol en la Guyana francesa, observó que, al comienzo del segundo año de barbecho, la relación C-N del suelo superior empezó a decrecer, mientras que el ácido fúlvico de la materia orgánica

aumentó, indicando el comienzo del proceso de enriquecimiento de N. El mismo autor también observó que la capa de mantillo se restablece después de cuatro años de barbecho y alcanza valores comparables (a los 10 años) a los de un bosque maduro de 11 años. Sánchez* destaca que la agricultura nómada no causa un agotamiento en los contenidos de materia orgánica, sino que alcanza niveles de equilibrio ligeramente más bajos que los que tenía el bosque virgen antes de ser tumbado. Un hecho importante para el manejo de áreas bajo agricultura nómada es el siguiente, comentado por Sánchez³¹:

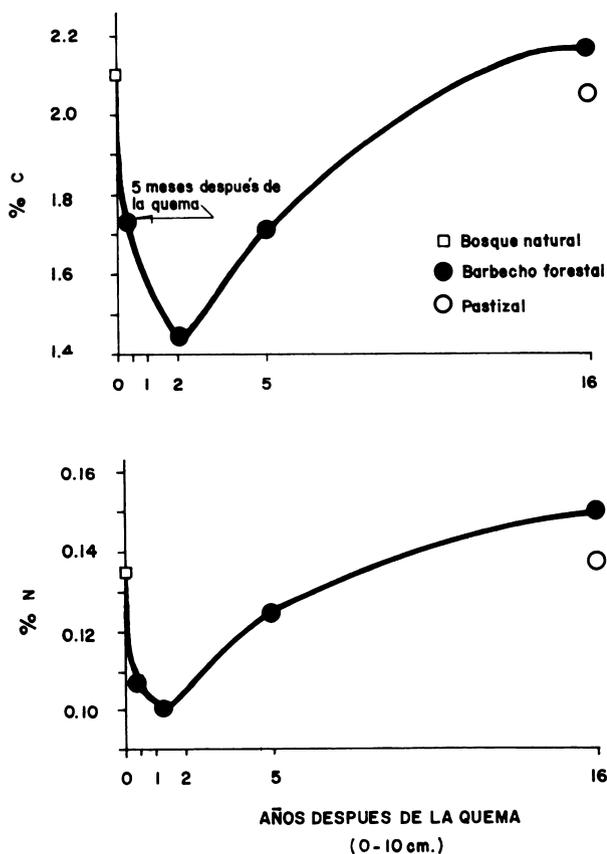


FIG. 27. Niveles de materia orgánica del suelo mineral (0-10 cm) en el bosque del Carare, valle del Magdalena, Colombia. Barbechos con edad y tipo de vegetación conocidos. Suelo Aeric Ochraquox, pH 3.8, 3000 mm de lluvia.

FUENTE: Salas, De las y Foelster³⁰, y Salas, De las²⁹.

* Conferencia dictada en Lima, Perú, Agosto de 1982.

“Después de analizar 100 lugares con agricultura nómada en Liberia, Reed encontró que el carbono orgánico alcanzaba el equilibrio a un nivel equivalente al 75% de los valores del bosque virgen; este hecho se ilustra en la línea superior de la figura 29, la cual representa una razón cultivo-barbecho de 2:12 años. De acuerdo con Nye y Greenland²², cuando la razón cultivo-barbecho se vuelve más estrecha, debido a presiones de la población, un nuevo nivel de equilibrio se logra a aproximadamente el 50% de los valores del bosque virgen, lo cual se ilustra en la línea inferior de la figura 29. En el caso de áreas de sabana, una razón cultivo-barbecho más amplia de 1:12 años es necesaria para alcanzar el equilibrio de contenido de carbono orgánico de 75%, por cuanto las adiciones de materia orgánica son mucho más bajas que en el bosque, de acuerdo con los autores anteriores. Ellos estimaron que la tasa promedio anual de descomposición del carbono orgánico era del orden del tres por ciento en áreas de agricultura nómada”.

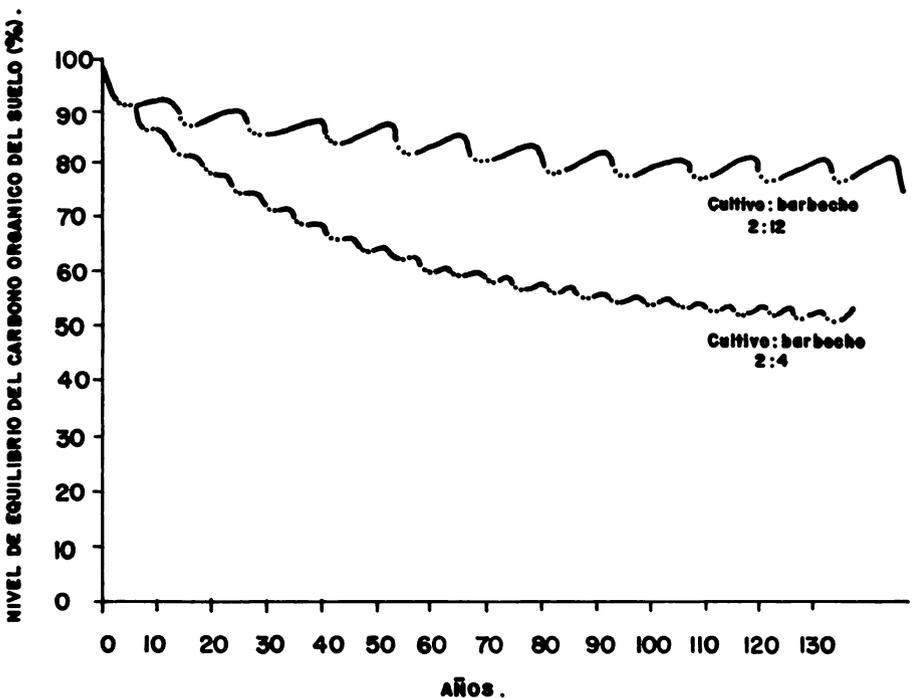


FIG. 28. Representación teórica de los cambios en carbono orgánico del suelo a los 30 cm superiores por efecto de la razón cultivo: barbecho. Las líneas discontinuas representan períodos de dos años de espera para que el barbecho se restablezca por sí mismo.

FUENTE: Nye y Greenland²².

Una tasa de descomposición similar fue encontrada por de las Salas y Foelster³⁰ en Colombia. El Cuadro 31 del Cap. 8 relaciona las tasas de descomposición o pérdida anual de carbono orgánico, según el tiempo y tipo de cultivo, así como los años estimados para que se produzca el 50% de descomposición. Estos datos son importantes cuando se desean manejar los suelos para mejorar la productividad de los cultivos.

Manejo del suelo bajo agricultura migratoria

Este tema se trata *in extenso* en la obra de Sánchez³¹, por lo que aquí nos referiremos solamente a algunos aspectos importantes, desde el punto de vista de la relación suelo forestal-planta. Dicho aspecto interesa no sólo al forestal, sino a todos aquéllos que tienen que planificar el uso de la tierra en los trópicos.

Los principales aspectos que deben considerarse son: la escogencia del método de aclareo del bosque, el manejo del suelo para producción continua de cultivos anuales, el manejo del suelo para pastos y leguminosas con el fin de producción de ganado y el manejo de la producción de cultivos perennes.

El Cuadro 42 resume los principales efectos de varios sistemas de desmonte, en cuanto a la producción de cultivos y los cambios ocurridos en los primeros horizontes del suelo, en un sitio de América Tropical.

CUADRO 42: Efectos de sistemas de desmonte en la producción de cultivos y cambios en los 50 cm superiores de un Entisol de Santa Cruz, Bolivia 1/.

Método de desmonte	Costo de desmonte (1957) (US\$/ha)	Arroz de secano producción (3 años) (t/ha)	Caña de azúcar producción (5 años) (t/ha)	pH Suelo	M.O. %	P disp. (Bray) (ppm)	K Interc (me/100g)
Roza, tumba y quema sin arar.	41	5.0	338	7.1	4.5	37	0.60
Desmonte con tractor, arado, rastrillado y nivelación.	92	5.5	343	7.1	3.2	17	0.32
Desmonte con tractor con raspa para raíces; arado, rastrillado y nivelación.	141	5.8	365	6.7	3.9	21	0.53

1/ Reproducido con autorización del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, (IICA).

FUENTE: Cordero, adaptación de Sánchez³¹.

CUADRO 43: Cambios en algunas propiedades químicas del suelo superior, antes y después de la quema del bosque en la Amazonía 1/, Costa Rica 2/ y Colombia 3/.

Propiedad del suelo	Tiempo	Yurimaguas (2 sitios)		Manaus (x 7 sitios)		Belem (x 60 sitios)		Barrolandia (1 sitio)		Turrialba C. Rica (1 sitio)		Carare Colombia (1 sitio)	
		I (1) ^a	II (3) ^a	(0.5) ^a	(12) ^a	(1) ^a	(5) ^a	(2.75) ^a	(5) ^a				
pH (en H ₂ O)	antes	4.0	4.0	3.8	4.8	4.6	5.6	3.57					
	después	4.5	4.8	4.5	4.9	5.2	6.2	3.61					
Ca + Mg interc.	antes	0.5	0.8	0.7	0.1	0.6	0.6	0.04					
	después	0.41	1.46	0.35	1.03	1.40	0.34 b	0.46					
K interc.	antes	0.88	4.08	1.25	1.97	4.40	0.31	0.42					
	después	0.47	2.62	0.90	0.94	3.00	0.03	(0.04)					
Al interc. (me/100 g)	antes	0.10	0.33	0.07	0.12	0.07	0.06 b	trazas					
	después	0.32	0.24	0.22	0.12	0.16	0.06	trazas					
Al sat. (%)	antes	0.22	(0.09)	0.15	0.00	0.09	0.00	0.20					
	después	2.27	2.15	1.73	1.62	0.75	n.r.	1.40					
P disp. (ppm)	antes	1.70	0.65	0.70	0.9	0.28							
	después	(0.57)	(1.50)	(1.03)	(0.72)	(0.47)							
P disp. (ppm)	antes	81	52	80	58	34	n.r.	16					
	después	59	12	32	30	5		8					
P disp. (ppm)	antes	(22)	(40)	(48)	(28)	(29)		(8)					
	después	5	15	---	6.3	1.5	7.4	0.9 c					
P disp. (ppm)	antes	16	23	---	7.5	8.5	8.1	0.8					
	después	11	8	---	1.2	7.0	0.7	(0.1)					

1/ Sánchez³⁴; 2/ Ewel, J. et al⁹; 3/ de las Salas y Foelster³⁰.

a) meses después de la quema / b) datos expresados en % / c) fósforo total / n.r.: no reportado.

FUENTE: Adaptado de Sánchez³⁴.

Los resultados obtenidos por Cordero, con respecto al desmonte mecanizado, están en franco desacuerdo con los obtenidos por Villachica y Sánchez⁴¹, en el rendimiento de cultivos mecanizados después de la roza, la tumba y la quema en un suelo Ultisol en la selva amazónica peruana. Ellos demostraron que los rendimientos de los cultivos en desmonte, con equipo mecanizado, fueron consistentemente menores, tanto con fertilización como sin ella.

Los cambios en las propiedades del suelo, en diferentes partes de la Amazonía y las bajuras tropicales de Costa Rica y Colombia, han sido registrados por Sánchez³⁴, Ewel *et al*⁹, y de las Salas y Foelster³⁰, respectivamente. El Cuadro 43 resume estos cambios. La variabilidad de los datos debe atribuirse a la cantidad de ceniza acumulada, la proporción de biomasa forestal realmente quemada, las diferencias en los suelos y los métodos de aclareo del bosque. Por ejemplo, Da Silva (citado por el National Research Council²¹), estimó en sólo 20% la biomasa forestal realmente convertida en ceniza, al quemar un bosque sobre suelos antiguos (Ultisoles) en Bahía, Brasil. También analizó la composición de la ceniza de partes quemadas de diferentes especies de árboles y observó ámbitos muy amplios en los contenidos de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio. Observaciones similares comprobó de las Salas (datos no publicados) en quemas experimentales de bosques de diferente edad, en la región húmeda tropical del Valle Medio del Magdalena, Colombia. Estas informaciones sugieren que ciertas especies funcionan como acumuladores de nutrientes específicos.

Fertilidad del suelo y producción

Con pocas excepciones, la mayoría de los suelos tropicales de bajura han sido clasificados como de uso forestal y de protección. Hay pocos datos relevantes disponibles que demuestren la distribución exacta de estas tierras; el uso real y ocupacional de la tierra o los modelos de asentamientos humanos también están sujetos a apreciaciones subjetivas. Asimismo, es materia de investigación el saber la superficie de tierra abandonada al barbecho o poco utilizada, como resultante de la degradación de pastizales.

Se conoce, por otra parte, que los mejores suelos se encuentran a lo largo de los ríos o terrazas; sin embargo, una gran proporción está ya cultivada, dentro de un sistema de cosechas anuales (maíz, yuca, frijol, vegetales y otros) y cultivos permanentes (cítricos, pláta-

no, papaya, aguacate, palmas comestibles, inclusive café, en zonas bajas del Brasil y Centroamérica). Algunas tierras están explotadas de acuerdo con sistemas tradicionales de agricultura migratoria, cuyo modelo es suficientemente conocido en el mundo tropical. Se sabe también que es necesario un largo tiempo de barbecho en el sistema de roza, tumba y quema, para mejorar el nivel nutricional del suelo, hecho que supone una extensa disponibilidad de tierra para que el sistema sea exitoso.

Por innumerables publicaciones, reconocemos que una extensa proporción de suelos del trópico húmedo se caracteriza por su alta acidez, toxicidad de aluminio y bajos niveles de fósforo disponible, potasio y materia orgánica, propiedades todas que indican una baja fertilidad y un potencial limitado para el crecimiento de cosechas (Sánchez *et al*³²). Una buena proporción de nutrimentos, utilizados en los sistemas tradicionales de agricultura del trópico, son obtenidos naturalmente a través de la quema y la tumba de la vegetación y por la descomposición de la materia orgánica, más que por su almacena-

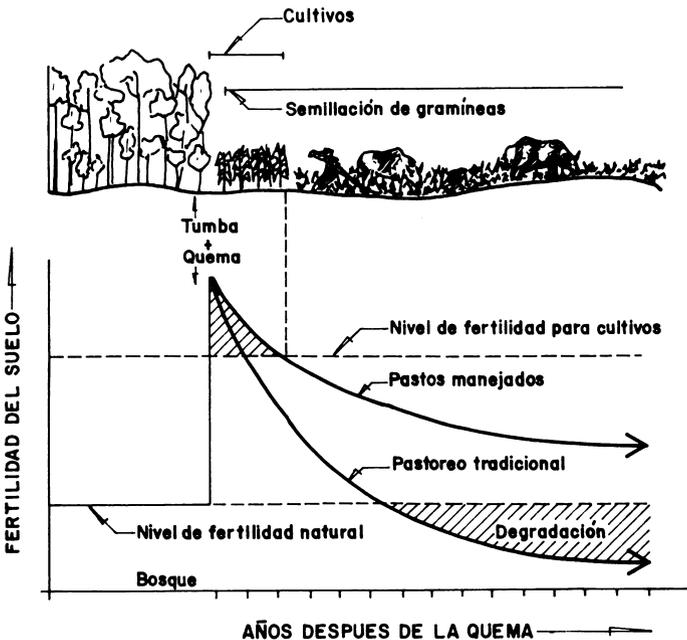


FIG. 29. Modelo de las tendencias probables en la fertilidad del suelo por cambio de bosque a pastos.

FUENTE: Toledo y Serrao³⁹.

miento en el suelo. El agricultor migratorio lo sabe y aprovecha este hecho para hacer los nutrientes realmente asimilables, cuando establece cultivos anuales o semipermanentes, o pastizales en tierras quemadas recientemente. La situación se ilustra en la Fig. 30. Estos ciclos cortos de cosecha, intercalados con períodos largos de barbecho forestal, requieren una cantidad mínima de fertilizantes o no requieren de ellos, pero pueden ser exitosos solamente en áreas con escasa densidad de población y en áreas con bosques suficientemente disponibles. La Fig. 31 representa un sistema original de manejo de rastrojos en la costa pacífica colombiana.

Como es bien sabido, los mecanismos del ciclaje de nutrientes de los bosques húmedos tropicales están localizados en la parte superior del suelo (biomasa), de modo tal que dependen más de la descomposición de la materia orgánica que del suelo mineral. Las características relevantes de este reciclaje de nutrientes y su explicación para el manejo y el sostenimiento a largo plazo de cultivos, en ecosistemas tropicales, lo resume Jordan¹⁸ (Cuadro 44).



FIG. 30. Maíz chococito sembrado entre el rastrojo (tres a cinco años), tumbado (sin quemar) y parcialmente descompuesto (después de cuatro a cinco meses de tumbado), aprovechando los nutrientes aportados por la mat. org. Bajo Calima, Colombia. 7600 mm lluvia, 27°C. Suelos arcillosos bien drenados (*Entic Dystrocept*) de terrazas marinas subcrescentes, extremadamente infértiles: pH: 4; P:2 ppm; CIC: 2-5 me/100 g.

CUADRO 44: Influencia del ciclo de nutrimentos en sistemas agroforestales tropicales.

Función	Bosques templados	Bosque amazónico	Implicaciones para los sistemas agroforestales tropicales
Localización de los mecanismos del ciclo de nutrimentos	en el suelo	en la biomasa aérea	Disminución de los rendimientos, a medida que la biomasa se descompone o es continuamente disturbada.
Índice de reciclaje de a/ nutrimentos	no disponible	alto (0.7)	Pérdida de muy pocos nutrimentos fuera del sistema, bajo cubierta continua de bosque natural o cultivos permanentes.
Capacidad de intercambio de Cationes b/ (CIC)	alta	baja	La mayoría de los suelos del trópico húmedo no son capaces de sostener cultivos sin fertilización. Suelos con una CIC alta presentan pérdidas menores de nutrimentos por lavado y responden mejor a la fertilización.
Cierre del ciclo de nutrimentos	Procesos de sucesión lentos, debido a humedad y temperaturas limitantes.	Plantas sucesionales absorben rápidamente los nutrimentos, después de la tumba del bosque.	Pérdida de pocos nutrimentos con manejo adecuado de la cobertura vegetal.
Latencia de semillas	larga	corta	Regeneración natural depende de la fuente inmediata de semillas (árboles semilleros)

a/ Este índice compara la cantidad de nutrimentos reciclados con la total del sistema. Un índice alto de reciclaje (cercano a uno) significa que la mayoría de nutrimentos del sistema son reciclados.

b/ Una baja CIC indica que existen muy pocas cargas negativas en el suelo, capaces de retener o intercambiarse con cationes positivos como Ca^{+2} , K^{+} y Mg^{+} .

FUENTE: Jordan¹⁸.

Una estrategia sencilla para retardar la declinación del rendimiento de las cosechas, en áreas de agricultura nómada, es la selección de mejores suelos. Un ejemplo excelente de tal selección lo aporta Morán (citado por Sánchez³⁴), quien muestra la forma de selección, utilizando criterios elementales por un tipo de agricultor migratorio cerca de Altamira, a lo largo de la transamazónica del Brasil. Los **caboclos**, nativos de la región, seleccionan sitios con árboles de tronco relativamente delgado, como acai (*Euterpe oleracea*), babacú (*Orbignya martiana*) y morocó (*Bauhinia macrostachia*). Los "colonos", o nuevos colonizadores, atraídos por los proyectos del gobierno, miran hacia el bosque virgen con árboles gruesos, tales como acapu (*Vouacaponia americana*) caju-a-cu (*Anacardium giganteum*) y jarana (*Holopyxidium jarana*).

Después de un año de practicar la agricultura de tumba, roza y quema, los suelos escogidos por los caboclos tenían un *status* nutricional superior a aquéllos escogidos por los colonos. El hecho puede observarse en el Cuadro 45. Estos datos sugieren que los caboclos identificaron áreas de suelos más fértiles (Alfisoles), por medio de la vegetación, mientras que los colonos nuevos seleccionaron suelos ácidos e infértiles (Ultisoles y Oxisoles), en donde crecían árboles más vigorosos, tal vez porque existía una menor población por hectárea. Los caboclos también cultivaron en su mayoría yuca, mientras que los colonos plantaron arroz, maíz y frijol, todos estos cultivos sin fertilización. Como resultado de su juiciosa selección de los suelos y de las especies escogidas dentro del sistema de agricultura nómada, las fincas de los caboclos percibieron ingresos dos veces mayores que los percibidos por los colonos civilizados. Aunque las especies indicadoras pueden diferir en otras regiones, esto constituye un buen ejemplo de experiencias acumuladas y una forma de prolongar los períodos de cosechas en suelos generalmente frágiles, como los existentes en las zonas de agricultura migratoria. Investigaciones, en este sentido y en otras partes de los trópicos, serían muy útiles para la planeación del uso de la tierra.

CUADRO 45: Propiedades del suelo superficial (0-10 cm) de terrenos seleccionados por caboclos y colonos cerca de Altamira, Brasil.

Tipo de agricultor	Arboles indicados (diámetro)	Color en húmedo	PH	C org. (%)	P disp. (ppm)	Intercambiable				Al sat. (%)
						Al	Ca+ Mg --- me/100 g ---	K	CIC ^{c/}	
Caboclo	delgados	10YR 4/4-	6.2	1.7	26	0	7.1	0.1	8.2	0
Colono	gruesos	7.5YR 4/5	4.3	2.3	2	5.5	1.1	0.2	6.8	81

a/ original no consultado. Datos tomados de Sánchez³⁴.

b/ promedio de tres muestras tomadas un año después de talar y quemar

c/ capacidad de Intercambio Catiónico efectiva.

FUENTE: Morán a/ b/.

Mejoramiento de barbechos forestales

Los cultivos artificiales, introducidos en rastrojos naturales, no siempre mejoran la productividad del suelo en términos de acumulación de nutrimentos, en biomasa o en rendimientos subsecuentes en los cultivos. Investigaciones realizadas en el Africa (Nigeria) por Jaiyebo y Moore (citados por Sánchez³¹), cotejaron varios tipos de cobertura vegetal: bosque pasto kudzú, pasto estrella, *Imperata cylindrica* y suelo descubierto. Estas coberturas fueron comparadas en su producción de biomasa y en los cambios efectuados en las propiedades del suelo superficial (0-10 cm). Sin embargo, no hubo cambios representativos en las propiedades del suelo, después de hacer observaciones en estos tipos de barbechos, durante siete años. No obstante, el kudzu, una leguminosa del trópico, ha probado ser especialmente adecuada para acelerar el reciclaje de nutrimentos y aportar estos valiosos bioelementos al suelo. De las Salas y Foelster³⁰ calcularon el capital de nutrimentos del suelo mineral, hasta 50 cm de profundidad, de dos rastrojos naturales de dos y cinco años de edad, en la región del Carare, Valle Medio del Magdalena, Colombia. Comprobaron que todos los nutrimentos estaban acumulados entre dos y tres veces en la vegetación natural de cinco años. Esto parece corroborar la opinión de que los barbechos naturales alcanzan su máxima productividad y su máximo aporte de bioelementos al suelo entre cinco y ocho años.

El Cuadro 46 ilustra la situación. Werner⁴² estudió los cambios nutricionales que experimentó el suelo, en áreas de sucesión forestal de diferentes edades, en suelos volcánicos de la selva húmeda tropical en Costa Rica. Comprobó que la sucesión empezaba con un corto lavado de los nutrimentos disponibles por la corta del bosque original. Este lavado ocurría simultáneamente con un incremento en los bioelementos intercambiables (hierro, aluminio, hidrógeno). Un efecto de "succión", por parte de la vegetación en estado regenerativo, fue hipotetizado para calcio y magnesio. El mismo autor concluyó que las reservas totales de nutrimentos en el suelo fueron altas y no mostraron signos de una disminución apreciable con el tiempo.

Comprobó también que los bosques de regeneración natural son de rápido crecimiento, con una producción de hojarasca pequeña; y, por el contrario, con el potencial de alcanzar la misma área basal que el bosque nativo en menos de 30 años. Lo que constituye una circunstancia afortunada, ya que la madurez de los bosques tropicales, una vez tumbados y dedicados a la agricultura migratoria, de-

mora en todo caso más de 30 años. La biomasa aérea total del bosque maduro —en el ejemplo de Costa Rica— fue calculada por el mismo autor en 382 ton/ha. Dicha biomasa contenía 19, 18 y 11% del nitrógeno total, calcio y potasio, respectivamente, en la vegetación más el suelo. En 31 años, el bosque de regeneración alcanza casi la misma biomasa que el monte natural. En contraste con estudios realizados en Panamá (Golley *et al*¹⁷), Colombia (de las Salas y Foelster³⁰), Suriname y Brasil (Stark³⁷) y Venezuela (Herrera *et al*; Jordan¹⁸), el suelo contribuye con importantes reservas al total de bioelementos. En la transformación de barbechos es necesario tener en cuenta que los cultivos agrícolas son más exigentes que los árboles de regeneración natural y, por lo tanto, demandan una mayor cantidad de nutrimentos disponibles, después de la tumba y la quema.

CUADRO 46: Reserva de bioelementos (kg/ha) en el suelo mineral (0-50 cm) de rastrojos en el Valle Medio del Magdalena, Colombia, y La Selva, Costa Rica.

Edad	Biomasa (ton/ha)	N	P		K	Ca	Mg
			Total	disp.			
2 a/	19	4750	570	189	104	18	46
5 a/	68	7575	916	338	162	335	141
8 b/	35	7700	4200	6	134	227	99

a/ Colombia; b/ Costa Rica

(la enorme diferencia en P disp., Ca y Mg entre los rastrojos colombianos se debe en parte al tipo de suelo: 2 años: vega abandonada; 5 años: *aeric ochracuox*).

FUENTE: de las Salas²⁹ y Werner⁴².

Para el caso que citamos de Costa Rica, Werner⁴² opina que más que los nutrimentos intercambiables, las altas reservas totales del suelo y su excelente estructura serían apropiadas (si no se alteran) para sistemas estables agroforestales.

Algunas especies del bosque natural húmedo se han mostrado muy prometedoras en regeneración natural, para ser utilizadas como alternativa de producción al sistema tradicional de barbechos no mejorados. En la Selva Central del Perú (valles de los ríos Pischis y Palcazu), Tosi y colaboradores del Centro Científico Tropical de Costa Rica comprobaron que la especie tornillo (*Cedrelinga catenaeformis*) regeneraba abundantemente en los claros, sobre suelos arenosos. Esta especie es una de las más valiosas por su madera, en la economía forestal del Perú. Valga mencionar también que los rastrojos naturales pueden ser mejorados, plantando especies forestales completamente distintas al sitio. Sánchez³¹ comenta que en las tierras altas de

Nueva Guinea, el pino australiano (*Casuarina sp*) ha sustituido en forma efectiva el barbecho natural. Su principal ventaja es que fija nitrógeno simbióticamente. Informa también (datos de Newton) que esta especie fue sembrada con los últimos cultivos y que se le dejó crecer por 10 a 20 años antes de cortarla. Los árboles se usan como madera para construcción y también como leña.

Agricultura de ladera

En las zonas de ladera de América Tropical se asienta entre un cuarto y un tercio de la población total, es decir, casi 200 millones. Toda esta población está practicando agricultura en zonas altas, en áreas montañosas. Un alto porcentaje de las fincas ubicadas en laderas empinadas, con más del 30% de pendiente, constituyen una preocupación permanente, no sólo para el planificador de la tierra sino para el mismo agricultor, ya que el control de la erosión y el manejo de las aguas constituyen puntos claves en los programas de conservación y manejo de suelos. El Cuadro 47 relaciona la superficie total de suelos de ladera en América Tropical, con la superficie arable y la población agrícola en esos paisajes, en 12 países. Para este estudio, los autores definen las laderas como aquellos terrenos con una pendiente mayor del ocho por ciento. La mayoría de la producción agrícola analizada se presenta en pendientes, entre 15% y 25%. La conclusión que se obtiene de este Cuadro es que un porcentaje importante de las tierras, en cultivos anuales, se encuentra ubicado en zonas de ladera.

En los trópicos andinos, el deterioro creciente del sector rural hace imperativo prestar mayor atención al potencial de los suelos de ladera, con el objeto de incrementar la producción de alimentos básicos y de recuperar las zonas erosionadas. Las zonas de ladera tienen un amplio potencial para contribuir a este propósito, ya que el desarrollo y bienestar de las antiguas civilizaciones amerindias tuvo su asiento en los altiplanos y laderas andinas, sitios que fueron también preferidos por los conquistadores españoles.

Es necesario señalar que el abandono de las tierras de ladera —excepción hecha del cinturón cafetero— es injusto, desde el punto de vista social y económico; por eso se debe demostrar su importancia, y su potencial debe ser evaluado y aprovechado.

CUADRO 47: Superficie total, superficie y población en las zonas de ladera de América Tropical 1/.

País	Superficie Total %	Superficie Arable 2/ %	Población agrícola	
			Porcentaje de la población nacional %	Porcentaje de la población agrícola %
México	45	20	15	45
Guatemala	75	30	40	65
El Salvador	75	40	30	50
Honduras	80	15	15	20
Costa Rica	70	25	20	30
Panamá	80	10	15	30
Jamaica	60	50	15	30
Haití	80	70	50	65
Rep. Dominicana	80	15	15	30
Colombia	40	25	15	50
Ecuador	65	25	25	40
Perú	50	25	25	50

1/ Los datos de este Cuadro son tentativos. Se basan en fuentes de USAID, FAO y el Banco Mundial, en estimativos personales de los autores.

2/ La superficie arable incluye sólo la tierra usada para cultivos anuales. Se refiere a las tierras cultivadas y/o en estado de abandono, lo que es parte de la rotación normal. Así, el terreno arable incluye toda la tierra en caña de azúcar, algodón y otros cultivos anuales, pero excluye los cultivos perennes como el café y bananos, así como los terrenos con pastos permanentes.

FUENTE: Posner y McPherson²⁶.

LOS SUELOS DE LADERA

Características, distribución e importancia

Características

Las características físicas, químicas y biológicas de los suelos de ladera varían mucho, debido a los contrastes climáticos, fisiográficos y geológicos, así como a diferencias de drenaje y nivel de fertilidad. Generalmente estos suelos han sido expuestos a una erosión continua durante muchos años, acelerada por un uso inapropiado. Por lo tanto, su infertilidad se debe a la pérdida del horizonte orgánico-mineral. Recientemente, se ha comprobado que la infertilidad de algunos suelos antiguos en las cordilleras, se debe también a una fuerte meteorización de su material parental durante el último levantamiento tectónico (Foelster y von Christen¹⁶). En suelos disturbados, generalmente, las deficiencias nutricionales no son comunes, debido en gran parte a la naturaleza de la recirculación de nutrimentos y a la capacidad de los hongos micorrícicos de hacer disponibles especialmente el nitrógeno y el fósforo. En contraste, la pérdida de la capa orgánica del suelo se lleva consigo estos dos importantes nutrimentos.

El drenaje interno es una característica física muy importante en los suelos de ladera. En terrenos utilizados intensamente para ganadería, y luego abandonados, el drenaje interno puede estar impedido en los primeros 5 a 10 cm. Esta actividad degrada los suelos, cuando se practica en pendientes pronunciadas (mayores de 30%), por su efecto de creación de pequeños embalses, debido a la formación de trillos y, en el caso de sobrepastoreo, por la exposición del suelo y su compactación superficial. Ruiz* estima que este fenómeno reduce el vigor de crecimiento del pasto, a la vez que la cobertura vegetal del suelo. La profundidad y el drenaje se toman como características fundamentales en la clasificación de la calidad de los suelos de ladera (Posner, J. *et al*²⁷). Dentro de la característica de profundidad, estos autores dividen los suelos en litosoles, suelos superficiales y suelos profundos. Al primer grupo pertenecen los suelos cuyo material parental se encuentra dentro de los 10 cm de profundidad. Los suelos superficiales se identifican como aquéllos que presentan una fase lítica y cuyo material parental puede aparecer endurecido cerca de la superficie, lo cual impide el crecimiento de las raíces dentro de los 50 cm de profundidad. Los suelos profundos no tienen un impedimento físico para la penetración de las raíces en su primer metro de profundidad.

La característica de drenaje, en los suelos de ladera, es evaluada por los autores anteriores conjuntamente con la fertilidad, ya que existen suelos bien drenados pero de una baja fertilidad natural, y viceversa. El Cuadro 48 ilustra una clasificación general de los suelos de ladera, de acuerdo con las características mencionadas.

CUADRO 48: Clasificación de suelos de ladera y altiplanos de América Tropical

Símbolo	Profundidad (cm)	Características	Calidad
1	< 10	Litosoles generalmente asociados con fuertes pendientes; Entisoles	muy pobre
2	10 - 5	Alfisosoles, Inceptisoles mal drenados o muy infértiles (<i>Dystrandeps</i>), generalmente ácidos pseudopodolizados (<i>Placandeps</i>), bajo bosque de pino y ciprés; Entisoles.	pobre
3a.	> 100	Andosoles en su mayoría, bien drenados y de alta fertilidad; Vertisoles de alta fertilidad	buena
3b.	> 100	Suelos con muy baja fertilidad: Oxisoles, Ultisoles y algunos Inceptisoles (<i>Dystrandeps</i>)	pobre

FUENTE: Adaptado de Posner, J. *et al*²⁷.

* Ruiz, M. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica; Comunicación personal.

Distribución

El Cuadro 49 resume la distribución de los suelos de ladera de América Tropical y aporta criterios sobre su calidad.

Posner *et al*²⁷ anotan que, en la categorización utilizada en su clasificación, no pusieron énfasis en la susceptibilidad a la erosión y en los problemas específicos de nutrimentos, como la fijación del fósforo en suelos volcánicos. Parten del hecho de que, si las acciones para remediar tales situaciones fueran económicamente justificadas, los pequeños agricultores adoptarían las recomendaciones necesarias. De esta manera, se indican en el Cuadro 48 como **suelos buenos** aquéllos que no acusan problemas de estructura o de nivel nutricional. Aunque esta clasificación merece mayor escrutinio por su relativa ambigüedad, merece destacarse como el primer intento conocido por el autor de agrupar los suelos de las laderas y altiplanos americanos, con base en su calidad. Se aprecia, en el Cuadro citado, que un 34% (137 000 km²) de la Región Centroamericana está clasificado como de **alta calidad**. Llama la atención que el 76% de El Salvador esté cubierto por suelos buenos. Los más pobres (alta acidez, baja fertilidad) predominan en zonas de alta precipitación de la Costa Atlántica. En el Caribe, se advierte la alta proporción de suelos pobres superficiales en República Dominicana (84%) y Haití (86%). En los países andinos se le asigna el mayor porcentaje de litosoles (72%) al Perú, tal vez debido a su extensa geografía de paisaje de Sierra. Los suelos pobres corresponden a paisajes de laderas bajas o altillanuras de selva (Llanos, Amazonía). Los suelos buenos se localizan en los valles intermontanos.

Producción

Los suelos de ladera revisten especial importancia para la productividad, erosión y conservación, ya que, como se dijo anteriormente, entre un cuarto y un tercio de la población de América Tropical practica agricultura en las zonas montañosas. En Colombia, existen aproximadamente nueve millones de hectáreas de topografía montañosa de clima medio (1200 - 1800 m), en donde se practica una agricultura de baja tecnología y en su mayoría de subsistencia (a excepción del cultivo del café). Estas zonas de ladera representan un gran potencial, no sólo en Colombia sino en los países andinos. De acuerdo con estimaciones de Valderrama⁴⁰ —resumidas en

CUADRO 49: Distribución de la calidad de suelos por países en las laderas y altiplanos de América Tropical.

	Suelos buenos		Suelos pobres	
	Profundos	Profundos	Suelos Superficiales	Litsoles
I. AMERICA CENTRAL				
Guatemala	31 680	12 420	45 513	0
	35	14	51	—
El Salvador	15 057	2361	2340	0
	76	12	12	—
Honduras	28 640	19 125	44 685	0
	31	21	48	—
Nicaragua	21 015	58 732	26 010	0
	20	56	24	—
Costa Rica	18 540	8028	16 665	0
	50	21	29	—
Panamá	21 465	29 710	7380	0
	37	51	12	—
TOTALES	136 397	130 376	136 593	0
	34	32	34	—
II. EL CARIBE				
República Dominicana	1440	1530	23 085	1175
	5	6	84	5
Haití	3105	0	18 855	0
	14	0	86	0
Jamaica	4892	180	2610	1485
	53	2	29	16
Puerto Rico	4710	1170	0	0
	80	20	0	0
TOTALES	14 147	2880	44 550	3060
	22	4	69	5
III. SUDAMERICA				
Venezuela	101 610	308 520	31 050	56 610
	21	62	6	11
Colombia	66 240	146 841	133 560	141 210
	14	30	27	29
Ecuador	55 790	55 204	0	65 790
	32	31	0	37
Perú	101 520	78 753	0	470 250
	26	12	0	72
Bolivia	184 860	57 600	0	196 065
	42	13	0	45
TOTALES	510 020	747 918	164 610	929 925
	23	29	7	41
IV. Totales región de estudio	660 564	780 174	345 753	932 985
	24	29	12	35

a/ cifra superior en km² / b/ cifra inferior en %.

FUENTE: Posner, J. *et al*²⁷.

el Cuadro 50—, la agricultura de ladera contribuye con casi toda la producción de alimentos y productos agrícolas de exportación de Colombia, Ecuador, Perú y Bolivia. Los cultivos que constituyen la base alimenticia de estos países se producen también, en un alto porcentaje, con agricultura de ladera. Este es el caso del maíz, caña panelera, frijol, plátano, yuca y papa, entre los principales. En la producción de carne vacuna y leche, la participación de las zonas de ladera es importante, aunque menor que otros cultivos agrícolas. La producción de especies menores —como ovejas— constituye un renglón destacado en algunas zonas andinas.

El uso de la tierra en las laderas

La complejidad del ambiente biofísico de las laderas ha sido una condición determinante para el establecimiento de múltiples posibilidades del uso de la tierra; algunas de ellas son altamente destructivas del suelo. Los usos de la tierra más frecuentes en las laderas colombianas y, en general, en América Tropical, son los siguientes: cultivo anual, cultivo perenne, pastos, plantación forestal, sistema mixto agroforestal, cultivo múltiple, sucesión natural, bosque secundario y bosque primario. Resulta obvio que el cultivo más detrimental del suelo es el cultivo limpio, hecho en el sentido de la pendiente. Es lógico, por otra parte, que la tasa de erosión de los suelos de ladera debe ser mínima, bajo una cubierta vegetativa nativa de varios estratos (caso de los cafetales tradicionales) y, en el caso extremo, que un uso de la tierra que exponga toda la superficie del suelo o parte de ella a la acción directa de la lluvia y el viento, favorecerá al máximo el desarrollo del proceso erosivo, dando origen a paisajes denudados, tan comunes en las laderas de nuestras vertientes andinas. Para ilustrar este planteamiento, se citan algunos resultados de experimentos conducidos por Suárez de Castro y Rodríguez Grandas³⁸ en Chinchiná, Colombia*, dentro de los escasos datos que se encuentran disponibles:

CUADRO 50: Participación estimada de la producción de ladera de algunos cultivos en la Región Andina

PRODUCTOS	LADERA	← PORCENTAJE EN →	PLANO
INDUSTRIALES Y EXPORTACION			
Azúcar	2		98
Algodón	0		100
Oleaginosas	5		95
Maíz duro (industrial)	(+)		30
Cebada	50		50
Café	98		2
Cacao	30		70
Banano	0		100
ALIMENTOS			
Arroz	10		90
Frijol	85		15
Maíz duro	70		(+)
Maíz amiláceo	100		0
Trigo	80		20
Yuca	80		20
Plátano	90		10
Panela y mieles	80		20
Hortalizas	40		60
Frutas	80		20
Papas	90		10

FUENTE: Valderrama⁴⁰.

* 2777 mm lluvia anual, 248 días lluviosos al año.

Del Cuadro 51 se deduce claramente que las tasas de escorrentía varían en proporción inversa a la protección del suelo. Asimismo, se observa que el arrastre de sedimento es máximo (798 t/ha) en el cultivo limpio y mínimo (0.5 t/ha) en el cafetal viejo (compuesto en la región de investigación por varios estratos).

CUADRO 51: Escorrentía y tasas de erosión bajo diferentes coberturas (promedio de 18 sitios, durante 6 años).

Cobertura	Número de predios	Escorrentía mm/ha/año	% de la lluvia	Arrastre de sedimento t/ha.
Cafetal viejo	4	59	2.2	0.5
Cafetal joven	4	234	8.7	2.2
Restos Vegetales (mulch) + pasto	1	799	25.9	32.1
Vegetación herbácea (<i>Indigofera indica</i>)	5	700	29.6	37.7
Maíz en rrastrajo	1	1054	39.0	166.0
Maíz (monocultivo)	3	1551	59.0	798.0

1/ 2775 mm lluvia anual, 248 días lluviosos al año.

FUENTE: Suárez de Castro y Rodríguez-Grandas³⁸.

En un ámbito más amplio, Brünig³ compara la tasa de erosión anual en el trópico húmedo, cuando se utiliza el suelo con cultivo y bosque. Estos datos se resumen en el Cuadro 52.

CUADRO 52: Tasa de erosión del suelo en el trópico húmedo, según el tipo de vegetación

Tipo de Cobertura	Tasa de erosión anual			
	mm suelo		t/ha	
Monocultivo de algodón, tierra casi plana		4		80
Rotación de cultivos, tierra casi plana		1.6		32
Pradera densa, tierra plana	0.1	— 100	20	— 100
Cultivo de laderas nuevas (después de talar y quemar)	30	— 60	600	— 1200
Bosque virgen, terreno ondulado	< 0.01	— 0.5	< 0.2	— 10
Bosque virgen, laderas pronunciadas	0.5	— 2	10	— 40
Bosque artificial denso, sin cobertura inferior	1	— 8	20	— 160
Bosque artificial ralo, con cobertura inferior	0.1	— 0.5	2	— 10

FUENTE: Brünig³.

A la luz de estos datos, si bien merecen mayor escrutinio, es completamente claro que el uso más detrimental del suelo en laderas es la tala y posterior quema del bosque, para dedicar la tierra a cultivos limpios. Los datos para el bosque virgen son similares a los de pradera densa y bosque artificial ralo con cobertura inferior, aunque las pendientes no son comparables. Los datos del Cuadro 52 se han considerado útiles para los planificadores del uso de la tierra y por eso se han incluido a manera de ejemplo.

Una visión común entre los planificadores, los investigadores y los que toman decisiones, es que las zonas de ladera son de dudosa productividad y que la gente que las cultiva está degradando el ambiente y creando problemas a los habitantes de las zonas más bajas, sobre todo sedimentación, deslizamientos e inundaciones. Se especula a menudo con el concepto de que los campesinos abandonarían sus cultivos de ladera para migrar a otras regiones y buscar otra ocupación, si existiera la posibilidad.

Por otra parte, existe controversia sobre la fragilidad ecológica de las laderas y su grado de erosión. Mientras unos afirman que hay evidencia de una degradación progresiva acelerada (Eckholm⁸, CEPAL; citado por Posner y McPherson²⁶), otros argumentan que los métodos tradicionales del uso de los recursos de estas áreas son altamente adaptables y constituyen sistemas estables, que han sostenido el potencial productivo (Denevan, citado por Posner y McPherson²⁶). Lo cierto es que la "marginalidad" de estas áreas y su potencial de erosividad deben ser juzgados para cada caso en particular, con base en los parámetros biofísicos y las condiciones socioeconómicas de la región en estudio.

RESUMEN

1. La agricultura migratoria es todavía la práctica predominante de uso del suelo en los trópicos húmedos. Cubre aproximadamente el 30% de los suelos explotables del mundo y es el medio de subsistencia de más de 250 millones de personas.
2. La tumba y quema del bosque tropical y la posterior utilización del suelo para cultivos produce cambios importantes, entre los que merecen mención: pérdida de materia orgánica muy rápida, inmediatamente después de la quema; aumento de la temperatura del suelo superior (0-5 cm); pérdida por volatilización de algunos bioelementos, especialmente S y N; alteración del régimen de humedad del suelo; deterioro de la estructura de suelos arenosos, causa de serias pérdidas por erosión (estas pérdidas son menores en otro tipo de suelos, como Andosoles y Oxisoles). Los sitios con un alto contenido de materia orgánica no se degradan, como se afirmaba hasta hace unos años. Aunque se sucede un descenso rápido en los niveles de carbono orgánico y nitrógeno, estos elementos recobran su equilibrio durante las fases de sucesión de la vegetación.

3. El manejo del suelo en áreas de agricultura migratoria debe contemplar los siguientes aspectos: la escogencia del método de aclareo del bosque; el sistema de manejo para producción continua de cultivos anuales, pastos y leguminosas, destinados a la producción ganadera; el manejo de la producción de cultivos perennes.
4. La mayoría de los suelos tropicales, con pocas excepciones, han sido clasificados como de uso forestal y de protección. Se conoce también que es necesario un largo período de barbecho en el sistema de roza, tumba y quema para mejorar el nivel nutricional del suelo; ello supone una extensa disponibilidad de tierra. Estos ciclos cortos de cosecha, intercalados con períodos largos de barbecho, requieren una cantidad mínima de fertilizantes o no necesitan de ellos, y pueden ser exitosos en áreas con escasa densidad de población.
5. Los mecanismos del reciclaje de nutrimentos del bosque húmedo tropical están localizados en la parte superior (biomasa), así que dependen más de la descomposición de la materia orgánica que del suelo mineral. Cuando existe una cubierta de bosque natural o de cultivos permanentes, se sucede una pérdida mínima de nutrimentos fuera del sistema.
6. Los barbechos forestales de 5, 8 y 10 años acumulan gran cantidad de nutrimentos en sus biomásas, lo que parece indicar que la vegetación ejerce un efecto de succión. En la transformación de barbechos, es necesario tener en cuenta que los cultivos agrícolas son más exigentes que los árboles de regeneración natural y, por lo tanto, demandan una mayor cantidad de nutrimentos después de la quema. Algunas especies del bosque tropical húmedo se han mostrado muy prometedoras en regeneración natural, para ser utilizadas como alternativa de uso del suelo en áreas de agricultura nómada. Tal es el caso del tornillo (*Cedrelinga cataeniformis*) en la Amazonía peruana.
7. Las zonas de ladera de América Tropical son importantes para la producción agrícola, ya que en ellas se asienta entre un tercio y un cuarto (200 millones) de la población total.
8. Las características físico-químicas y biológicas de los suelos de ladera varían mucho debido a los contrastes climáticos, fisiográficos y geológicos, así como a diferencias de drenaje y nivel

de fertilidad. Generalmente estos suelos han sido expuestos a una erosión continua, acelerada por un uso inapropiado. Por eso, su infertilidad se debe principalmente a la pérdida del horizonte orgánico-mineral. Recientemente se ha comprobado que la infertilidad de algunos suelos antiguos, en las cordilleras, se debe también a una meteorización fuerte del material parental, durante el último levantamiento tectónico. El drenaje interno y la profundidad son características físicas muy importantes en suelos de ladera. En terrenos utilizados intensivamente para ganadería, y luego abandonados, el drenaje interno puede estar impedido en los primeros 10 cm. Esta actividad es especialmente degradante de los suelos, cuando se practica en pendientes pronunciadas (mayores de 30%).

9. Los usos más frecuentes de los suelos de ladera de América Tropical son: cultivos anuales, cultivos perennes, pastos, plantación forestal, sistema agroforestal, cultivo múltiple, sucesión natural y bosque primario. Un uso que exponga la superficie del suelo a la acción directa de la lluvia y el viento, favorecerá el desarrollo del proceso erosivo. Un experimento en Colombia mostró que el arrastre de sedimento es máximo (798 t/ha) en el cultivo limpio y mínimo (0.5 t/ha) en un cafetal viejo, con tres estratos de vegetación. El uso más detrimental del suelo en laderas es la tala y posterior quema del bosque para dedicar la tierra al cultivo limpio.

BIBLIOGRAFIA

1. BARTHOLOMEW, W.V.; MEYER, I.; LAUDELOUT, H. 1953. Mineral nutrient immobilization under forest and grass fallow in the Yangambi (Belgian Congo) Region. INEAC. Ser. Sci. 57. Brussels. Institut National pour l'Etude Agricole du Congo. p. 1-27.
2. BRINKMAN, W.L.F.; DO NASCIMENTO, J.C. s.f. The effect of slash and burn agriculture on plant nutrients in the tertiary region of Central Amazonian. *Turrialba* 23(3):284-290.
3. BRUNIG, E.F. 1975. Tropical ecosystems: state and targets of research in the ecology of the humid tropical ecosystems. *Plant Research and Development* 1:22-38.
4. BUDOWSKI, G. 1956. Tropical savannas; a sequence of forest felling and repeated burning. *Turrialba* 6:23-33.
5. COCHRANE, T.T.; SANCHEZ, P.A. 1982. Land resources, soils and their management in the Amazon Region: a state of knowledge report. p. 137-209. In Hecht, S. (ed.). *Amazonian: agriculture and land use research. Proceedings of an international conference.* Cali. Centro Internacional de Agricultura Tropical. 428 p.
6. CONCKLIN, H.C. 1963. The study of shifting cultivation. Pan-Am. Union Studies and Monographs, No. 6. Washington, 165 p.
7. DASMANN, R.F.; MILTON, J.P.; FREEMAN, P.H. 1973. *Ecological principals for economic development.* Wiley & Sons.

8. ECKHOLM, 1976. La tierra que perdemos; crisis y agotamiento de los recursos naturales. Buenos Aires. Edic. Tres Tiempos. 279 p.
9. EWEL, J.J. *et al.* 1981. Slash and burn impacts on a Costa Rican wet forest site. *Ecology* 62(3):816-829.
10. FAO. 1957. Shifting cultivation. *Trop. Agr. (Trinidad)* 34:159-164.
11. _____. 1973. Improving soil fertility in Africa *FAO Soils Bull.* 14. 145 p.
12. _____. 1974. SIDA. Shifting cultivation and soil conservation in Africa. *FAO Soils Bull.* 24. 248 p.
13. _____. 1982. Los recursos forestales tropicales. Estudio de Montes No. 30. Roma. 113 p.
14. FOELSTER, H. 1971. Ferrallitische böden aus sauren metamorphen gesteinen in den feuchten und wechselfeuchten tropen Afrikas. *Göttingen Bodenkundliche Berichte* 20:1-231.
15. FOELSTER, H.; SALAS, G. DE LAS, 1974. Wasser als minimum factor in regenwald. *Mittl. Deutsch Bondenki. Ges. Göttingen.* 20 p.
16. _____ ; VON CHRISTEN, H. 1977. The influence of quaternary uplift on the altitude zonation on mountain soils of diabase and volcanic ash in humid parts of the Colombian Andes. *Catena* (2):33-63.
17. GOLLEY *et al.* 1975. Mineral cycling in a tropical moist forest ecosystem. University of Georgia Press. Athens, Georgia.
18. JORDAN, C.F. 1982. Amazon rain forests. *American Scientist.* 70:390-401.
19. LAL, R.; CUMMINGS, D.J. 1979. Clearing a tropical forest effects on soil and micro-climate. *Field Crops Research* 2:91-107.

20. LAUDELOUT, H. 1960. Dynamics of tropical soils in relation to their fallowing techniques. Roma. FAO. 111 p.
21. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1982. Ecological aspects of development in the humid tropics; Chapter 7: soil management considerations. p. 157-175. Washington.
22. NYE, P.H.; GREENLAND, D.J. 1964. Changes in the soil after clearing a tropical forest. *Plant and Soil* 21(1):101-112.
23. _____; GREENLAND, D.J. 1960. The soil under shifting cultivation. Commonwealth Bureau of Soils. Harpenden. Tech. Comm. 51. 156 p.
24. OKIGBO, B.N.; LAL, R. 1979. Soil fertility maintenance and conservation for improved agroforestry systems in the lowland humid tropics. p. 41-77. In Mongi, H.O.; Huxley, P.A. (eds.). *Soils research in agroforestry: proceedings of an expert consultation*. ICRAF: Nairobi. Marzo 26-30.
25. PIMENTEL *et al.* 1981. Energy from forests: environmental and wildlife implications. *Interciencia* 6(5):329-343.
26. POSNER, J.; McPHERSON, F. 1980. Las áreas de ladera de México, Centroamérica, el Caribe y los países andinos: situación actual y perspectivas para el año 2000. In Novoa, A. y Posner, J. ed.): *agricultura de ladera en América tropical*. Memoria Seminario Internacional. Turrialba, Costa Rica. p. 77-91.
27. POSNER, J. *et al.* 1981. Un sistema de clasificación para las áreas de ladera y altiplanos de América tropical. In Novoa, A. y Posner, J. (eds.): *agricultura de ladera en América tropical*. Memoria Seminario Internacional. Turrialba, Costa Rica. p. 109-129.
28. REHM, S. 1975. Agricultural productivity in tropical countries with high rainfall. *Plant Research and Development*. 2:7-16.
29. SALAS, G. DE LAS. 1978. El ecosistema forestal Carare-Opón. CONIF. Serie técnica No. 8. Bogotá. Servigráficos. 88 p.

30. _____ ; FOELSTER, H. 1976. Bioelement loss on clearing a tropical rain forest. *Turrialba* 26(2):179-186.
31. SANCHEZ, P.A. 1981. Suelos del trópico, características y manejo. Traducido por Edilberto Camacho. San José, Costa Rica. IICA. Serie de Libros y Materiales Educativos No. 48, 634 p.
32. _____ *et al.* 1982. Amazon basin soils: management for continuous crop production. *Science* 216:821-827.
33. _____ ; 1973. Soil management under shifting cultivation. In Sánchez, P.A. (ed.). *A review soil research in tropical America*. North Carolina Agr. Exp. St. Tech. Bull. 219 p.
34. _____ . 1979. Soil fertility and conservation for agroforestry systems in the humid tropics of Latin America. In Mongi, H.O. and Huxley, P.A. (eds.). *Soils research in agroforestry; proceedings of a expert consultation*. ICRAF International Council for Research in Agroforestry, Nairobi, p. 79-124.
35. _____ . 1977. Alternativas al sistema de agricultura migratoria en América Latina. In FAO/SIDA: Reunión-Taller sobre ordenación y conservación de suelos en América Latina. Lima, Perú.
36. _____ ; BUOL, S.W. 1975. Soils of the tropics and the world food crisis. *Science* 188-598-603.
37. STARK, N. 1970. The nutrient content of plants and soil from Brazil and Surinam. *Biotropica* 2:51-60.
38. SUAREZ DE CASTRO, F.; RODRIGUEZ, GRANDAS, A. 1962. Investigaciones sobre la erosión y la conservación de los suelos en Colombia. Federación Nacional de Cafeteros, 473 p.
39. TOLEDO, J.M.; SERRAO, E.A.S. Pasture and animal production in Amazonian. p. 281-309. In Hecht, S.B. (ed.). *Amazonian; agriculture and land use research*. Proceedings of an international conference. CIAT. Cali, Colombia. 428 p.

40. VALDERRAMA, 1981. Contribución de la agricultura de ladera de la región andina en la economía nacional. In Novoa, A. y Posner, J. (ed.): *Agricultura de ladera en América tropical*. Memoria Seminario Internacional. Turrialba, Costa Rica. p. 77-91.
41. VILLACHICA, H.; SANCHEZ, P.A. 1980. Maintenance of soil fertility in the Amazon of Peru. 1. Soil dynamics. 2. Crop performance (manuscrito).
42. WERNER, P. 1982. The variation in soil properties under tropical rain forest succession in Costa Rica (manuscrito).

EL SUELO BAJO PRODUCCION PASTORIL Y AGROSILVOPASTORIL

La actividad ganadera en regiones húmedas tropicales

La ganadería y la agricultura han sido las actividades que más conflictos y opiniones controvertidas han generado. Brünig afirma, por ejemplo, que si quemaran todos los bosques de la Amazonía, el contenido de CO_2 de la atmósfera aumentaría en un diez por ciento y este hecho tendría repercusiones impredecibles durante largo tiempo.

Las estrategias geopolíticas de los países tropicales han estimulado la apertura de la selva al proceso bien conocido de tumba – roza – quema – cultivo – abandono – ganadería.

Ruiz⁵⁵ indica que existen factores favorables y adversos para el establecimiento de la actividad ganadera en el trópico húmedo. Como factores favorables anota: 1. déficit de producción de carne y leche en varios países americanos; 2. decisión de los Gobiernos de incorporar las regiones poco pobladas y generalmente boscosas al proceso productivo del

país, a corto plazo; 3. factores climáticos; 4. disponibilidad de tierras aprovechables para la ganadería. Como factores adversos identifica: 1. factores climáticos; 2. suelos; 3. nivel tecnológico y tradiciones; 4. enfermedades y plagas; 5. utilización de insumos costosos.

El clima

En la zona de vida tropical húmeda (2000 - 4000 mm de lluvia al año), con una distribución irregular de las lluvias, la concentración de éstas en un período corto ocasiona generalmente una fuerte lixiviación de nutrimentos, quedando los suelos sometidos a presiones severas de erosión, si se pastorea durante los meses lluviosos. Tales observaciones pueden comprobarse fácilmente, al recorrer las zonas de ganadería extensiva y mal manejadas de los trópicos americanos, ver por ejemplo Tosi⁷⁴; Parsons⁴⁸. En regiones húmedas, el pastoreo puede derivar en una rápida disminución de la productividad de los pastos, debido a los efectos de compactación del pisoteo en suelos arcillosos saturados; además, el control de malezas se hace prácticamente imposible y causa gradualmente una invasión de helechos, que pueden ser más tolerantes que el pasto a suelos ácidos infértiles. En épocas de alta pluviosidad, se presentan problemas de drenaje en las tierras bajas, generalmente en las zonas llamadas de **varzeas**. En las márgenes de los ríos puede presentarse una mayor incidencia de plagas y enfermedades, se dificulta la mecanización de las labores de campo y se acelera el desgaste de máquinas e implementos agrícolas (Alvim¹). En estas regiones, tanto el calor como la intensidad lumínica interactúan junto con la precipitación, para crear condiciones poco propicias para la práctica de la ganadería. Por ejemplo, en áreas húmedas y muy húmedas, con temperaturas, aun en la noche, superiores a 20°C, existe una alta incidencia de nubosidad, que reduce la tasa fotosintética (Tosi⁷⁴), reduciéndose al mismo tiempo la productividad de la pradera y del animal.

En épocas del año en las que la temperatura supera los 30°C, la tasa fotosintética disminuye, debido a la carga excesiva de calor en las plantas, a pesar de que existe todavía un nivel adecuado de humedad en el suelo. En el caso de los bovinos, la carga calórica sería superior al rango de comodidad animal y disminuye el consumo de alimentos, produciéndose una merma en la productividad, especialmente en ganado lechero. Además, el animal debe utilizar energía para liberarse del calor excesivo, restando así la cantidad de energía disponible para propósitos productivos (Ruiz⁵⁵).

Disponibilidad de suelos

Los suelos de selva húmeda se conocen en los trópicos americanos por su marcada infertilidad y extrema acidez. Basta saber que el 75% de la cuenca amazónica se caracteriza por tener este tipo de suelos, clasificados como Oxisoles y Ultisoles (Cuadro 53). Estos son suelos profundos, bien drenados, generalmente bien estructurados y con texturas que hacen posible una capacidad de infiltración aceptable para las plantas y, en general, para el desarrollo de praderas. Sánchez *et al*⁶⁵; Serrao *et al*⁶⁷; Hetsch³⁵, citado por Schubart y Salati⁶⁶ comprobaron que la sustitución de la cubierta forestal por praderas no fue particularmente exitosa en este tipo de suelos brasileños. Toledo y Serrao⁷³ opinan que se puede garantizar un proceso de reciclaje similar al ofrecido por el bosque nativo, manteniendo la fertilidad del suelo y produciendo alimento o materiales industriales para el beneficio del hombre, en suelos bien drenados y bien manejados de las selvas húmedas, por medio de plantaciones y pastos. Estas alternativas están siendo probadas en Yurimaguas, Amazonía peruana, y en la estación experimental de Pucallpa, Perú.

CUADRO 53: Distribución topográfica de los principales suelos de la Cuenca Amazónica en millones de hectáreas.

Grupo de Suelos	Planos mal drenados	bien drenados pendientes %			Total y (%)	
		0 - 8	8 - 30	+ 30		
Acidos, infértiles (Oxisoles, Ultisoles)	43	207	88	23	375	(75)
Aluviales, mal drenados (Acuepts, Acuents, Gley- soles)	56	13	1	---	70	(14)
Moderadamente fértiles, bien drenados (Alfisolos, Molisoles, Vertisoles, Tropcepts, Fluvents)	0	17	13	7	37	(8)
Arenosos, muy infértiles (Spodosoles, Psamments)	10	5	1	---	16	(3)
TOTAL	109	242	103	30	484	

FUENTE: Sánchez *et al*⁶⁵.

Existen, en la Cuenca Amazónica, 345 millones de hectáreas de suelos bien drenados, los cuales exhiben pendientes menores del 30%. Esta inmensa reserva de tierra representa un potencial extraordinario para la explotación agrícola, pecuaria y forestal. Tal aspecto merece estudiarse detalladamente. El principal obstáculo para la actividad ganadera lo representa, sin embargo, el *status* nutricional (baja fertilidad), más que las características físicas de los suelos. El

Cuadro 54 indica que el 90% de los suelos es deficiente en fósforo, aunque sólo el 16% tiene una alta capacidad de fijación de este elemento. Ruiz⁵⁵ opina que, para la ganadería, existe la alternativa de suministrar el fósforo directamente al animal. La toxicidad del aluminio es otra desventaja muy conocida en los suelos de bajuras tropicales (Oxisoles y algunos Ultisoles), como causa del pobre desarrollo de pastos en suelos ácidos. Este problema se presenta en el 73% de los suelos amazónicos. Finalmente, el Cuadro 54 destaca que el 92% de los suelos amazónicos presentan una protección natural contra la erosión, debido a sus bajas pendientes. Sin embargo, la alta intensidad de lluvia, así como el mal manejo de las praderas y la deforestación cada vez mayor para adaptar los suelos amazónicos a actividades ganaderas, crean condiciones muy favorables para la erosión. El Cuadro 55 presenta resultados preliminares, que resumen las pérdidas de suelos acumuladas, por causa de la erosión, en un período de 32 meses, en la región del Caquetá, Colombia.

CUADRO 54: Principales limitaciones de los suelos amazónicos bajo vegetación natural.

Problema a/	Millones de hectáreas	% de la Cuenca
Deficiencias de fósforo	436	90
Toxicidad de aluminio	352	73
Bajas reservas de potasio	271	56
Drenaje pobre, encharcamiento	116	24
Alta fijación de fósforo	77	16
Baja capacidad de intercambio Catiónico	71	15
Alta erodabilidad	39	8
Sin grandes limitaciones	32	6
Pendientes fuertes (> 30%)	30	6
Formación de lateritas	21	4
Escasa profundidad (< 50 cm)	3	0.60

a/ Las deficiencias de N, S, Mg y Zn, y sequías ocasionales, están bien difundidas, pero no pueden cuantificarse debido a la escasa disponibilidad de datos.

FUENTE: Sánchez *et al*⁶⁵.

Las mayores pérdidas ocurrieron, en este experimento, en el suelo desnudo; y las menores, en el suelo cubierto con la gramínea *Brachiaria ruziziensis*. El resultado es muy significativo, especialmente si se considera que la mencionada gramínea estuvo cubriendo las pendientes más pronunciadas. Esto significa que el *Brachiaria* provee una excelente protección contra el efecto erosivo de las lluvias y

presenta una alternativa del manejo del suelo en regiones ecológicamente similares; además, este pasto se ha adaptado bien a la región y es palatable al ganado. Otras coberturas, tales como el *Axonopus micay* y el *Pueraria phaseoloides* pueden ayudar significativamente a reducir la erosión.

Diferencias significativas pueden observarse con el maíz, como resultado del manejo del suelo y del mismo cultivo. Las mayores pérdidas ocurrieron con el arado convencional, pero estas pérdidas se refujeron grandemente cuando se introdujeron métodos de manejo del suelo, como incorporación de materia orgánica (*mulch*) y labranza mínima. Finalmente, la estructura protectora del bosque en sí, ayuda grandemente a reducir las pérdidas por erosión. Por otra parte, las mediciones de lluvia indicaron que aquéllas con una intensidad relativamente baja juegan un importante papel en el nivel de erosión, cuando el suelo está completamente expuesto a la lluvia. Apolo² reportó escasas pérdidas por erosión (2 ton/ha/año) en pastizales con árboles aislados, en la región húmeda de Turrialba, Costa Rica (2600 mm; 24°C). Estas tasas tan bajas de erosión fueron atribuidas al efecto de la cobertura vegetal (gramíneas) y a la conocida baja erodabilidad de los suelos volcánicos (Inceptisoles) de la región de estudio.

CUADRO 55: Pérdidas totales de suelo en 32 meses, con diferentes cultivos y sistemas de manejo en Caquetá, Colombia (4500 mm, 26°C, Oxisoles)

Cultivo	Manejo de suelo	Pendiente (%)	Pérdidas de suelo (t/ha)
Maíz	arado convencional	22	30.8
Maíz	arada reducida + mulch	22	8.5
Maíz	sin arada	22	8.2
<i>Pueraria phaseoloides</i>		28	2.8
<i>Brachiaria ruziziensis</i>		38	1.3
<i>Axonopus micay</i>		26	2.3
Bosque		32	1.6
-----	suelo desnudo	24	54.4

FUENTE: Navas⁴⁷.

El manejo de praderas húmedas tropicales

Una característica típica de todas las zonas húmedas tropicales es el manejo de las praderas o pastizales en forma extensiva y, naturalmente, sin aplicación de técnicas (fertilizantes, cultivos leguminosos y/o forrajeros, distintos tipos de labranza, rotación de potreros y otros).

Ruiz⁵⁵ comenta que en la Selva Central Peruana se encuentran praderas onduladas, cubiertas con pasto *Melinis minutiflora* durante los últimos 40 años, pero con una gran invasión de helechos, consecuencia de la ausencia de medidas de conservación de la fertilidad del suelo. Aunque las praderas están adecuadamente protegidas contra la erosión, por el hábito de crecimiento del pasto, la invasión de malezas y las propias características de la pobreza nutricional del pasto, hacen que la carga animal sea sumamente baja (alrededor de 0.7 animales/ha). Como resultado, las fincas se mantienen vendiendo el ganado y dejando descansar toda la finca o parte de ella por un tiempo determinado, seguramente prolongado; mientras las familias se trasladan a otra localidad en donde reiniciarán su actividad ganadera con los mismos problemas de manejo. Esta ganadería migratoria obliga a la población a emigrar y a incorporar nuevas tierras para esta actividad, fenómeno muy típico en los programas de colonización de los trópicos húmedos. Por otra parte, es bien conocido el método de preparación de potreros en todo el paisaje denominado llano (Colombia, Venezuela), en el cual se queman extensas superficies de rastrojo y bosque secundario para habilitarlas como pastizales. En la región norte de Nicaragua (Departamento de Nueva Segovia), se queman los pinares naturales (*Pinus oocarpa*) para transformarlos en pastizales naturales. Aunque éste es un caso insólito, merece citarse, por cuanto miles de hectáreas del bosque nativo se queman y degradan anualmente, seguramente porque no se han hecho esfuerzos en buscar alternativas de manejo del suelo en estos sitios. Las situaciones anteriores podrían prevenirse, mediante el uso de mejores pastos, menor carga animal y asociaciones con leguminosas u otros cultivos que permitan una tasa de explotación de las praderas y del suelo más acorde con sus potenciales (Ruiz⁵⁵). Otras medidas importantes y obvias para el mejoramiento del manejo de praderas tropicales son: la repoblación con especies resistentes al medio, el mejoramiento de la infraestructura, la sanidad y el manejo animal. Desafortunadamente, se han desarrollado métodos "de limpieza" del bosque que aceleran su proceso destructivo. Así, Ruiz⁵⁵ comenta que, en Costa Rica, se han reducido los costos de limpieza del monte de US\$450/ha a

sólo US\$127/ha (datos de Parsons⁴⁸). Según Toledo y Morales⁷², en la región amazónica de Pucallpa, el costo de desmonte se ha reducido de US\$97 a sólo US\$56/ha con el uso de un triturador de árboles. Estos métodos estimulan la expansión ganadera sin un programa paralelo de técnicas mejoradas de producción animal y de utilización complementaria del suelo, como serían los sistemas silvopastoriles. Una técnica sencilla del manejo de estos sitios, una vez desmontados, se ha evidenciado en el mantenimiento de especies menores (cerdos y aves), capaces de ayudar al mantenimiento del ciclo de nutrimentos (Bishop⁸). Spain *et al*⁷¹ comprobaron que las especies forrajeras más promisorias para suelos ácidos de la región de Carimagua, Llanos Orientales-Orinoquía, Colombia, fueron las siguientes: *Stylosanthes guianensis*, *Desmodium intortum*, *Kudzu* y *Centrosema pubescens*. Los pastos que ensayaron y dieron los mejores resultados fueron: gordura (*Melinis minutiflora*), puntero (*Hypharrhenia rufa*), brachiaria (*B. decumbens*) y pasto negro (*Paspalum plicatulum*).

Los diferentes aspectos del manejo de las praderas húmedas tropicales no son importantes en sí mismos, sino como partes o componentes de un sistema de producción animal. Este debe observarse tanto desde sus bases biológicas como dentro de un concepto socioeconómico de su utilización (Cubillos y Salazar²¹).

Ruiz⁵⁵ (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE), Turrialba, Costa Rica; comunicación personal) comparte el criterio de Alvim¹, en el sentido de que no es posible continuar con los sistemas tradicionales de manejo de praderas tropicales, como el de ganadería de subsistencia o tradicional y el sistema migratorio; pues éstos, si bien responden a los niveles tecnológicos de los interesados, no proveen a la economía nacional con niveles significativos de productos o no utilizan eficientemente los bienes y los servicios de los trópicos húmedos. Estos sistemas, además, constituyen garantías de un continuado estado de pobreza de quienes los practican. Parece que la presión demográfica ha impartido una aceleración del ciclo de desmonte y descanso, dando la impresión de una intensificación y mejoramiento del sistema, cuando en realidad han convertido el medio tropical en uno improductivo e inestable.

Mantenimiento de la fertilidad del suelo bajo bosque, barbechos naturales y cultivos permanentes

Un mantenimiento de la fertilidad del suelo, bajo distintos usos de la tierra, implica que los agroecosistemas deben estar caracterizados por:

- alta sustentabilidad agrícola;
- sustentabilidad social en términos de aprovechar en la mejor forma los rendimientos para el mayor número de usuarios;
- autosuficiencia máxima en términos de productos localmente generados;
- efectos mínimos sobre otros recursos;
- efectos macroecológicos minimizados.

Con base en estos cinco criterios, Fearnside³² propone 14 usos posibles de la tierra firme del Brasil, como opciones posibles que deben ser estudiadas en cada caso particular. El autor advierte que ninguna de estas opciones sola es una solución para los problemas del uso de la tierra de la Amazonía. Sin embargo, pueden de hecho resultar en agroecosistemas mejores y son una guía para los planificadores del desarrollo de los trópicos. Tales opciones pueden ser consideradas válidas para millones de hectáreas de bosque, en proceso de colonización en el trópico húmedo americano; y son las siguientes, ordenadas en forma creciente de perturbación ambiental:

1. bosque intacto;
2. extracción de productos forestales;
3. sistema de *Shelterwood* (dosel protector);
4. extracción selectiva con replante;
5. extracción selectiva sin replante o regulación;
6. enriquecimiento y/o envenenamiento selectivo de árboles;
7. plantaciones silviculturales;
8. corte o tala rasa sin replante;
9. plantaciones de cultivos perennes;
10. sistema taungya;
11. agricultura itinerante de cultivos anuales;
12. agricultura continua de cultivos anuales;

13. pastos con fertilizantes; y
14. pastos sin fertilizantes.

Estas opciones se ilustran en el Cuadro 56. En muchas áreas de agricultura nómada, una alternativa más factible es el cultivo de árboles que producirán cosechas en un tiempo relativamente corto. La ventaja de los cultivos arbóreos permanentes es que restablecen la fertilidad del suelo en corto plazo y tienen su propio ciclo cerrado de nutrimentos. Tal el caso de cultivos como cacao, palma aceitera, caucho y muchas frutas tropicales. Dubois²⁵, después de muchos años de observación y experimentación en el trópico húmedo brasileño (Belem), ha insistido en que los sistemas de producción más apropiados para el uso racional de las tierras boscosas del trópico húmedo son los de cultivos asociados de la región. Este sistema de cultivo presenta, además de la ventaja del conocimiento silvicultural de las especies, la del mantenimiento del germoplasma y el aumento de la productividad, prácticamente sin el requerimiento de insumos adicionales (fertilizantes), y la conservación de diversos tipos de manejo del suelo. Parece afortunado el hecho observado en Colombia y Venezuela por el autor, de que extensas superficies, antiguamente dedicadas a un pastoreo intensivo y hoy degradadas, se estén utilizando con especies forestales maderables (*Tectona grandis*, *Tabebuia pentaphylla*, *Gmelina arborea*, *Bombacopsis quinatum*, *Ceiba pentandra* y otras más).

Los sistemas agrosilvopastoriles

Los planificadores de la tierra prevén que en el futuro se borrarán las fronteras entre la agricultura y la silvicultura, por el empleo de tecnologías y principios básicos comunes. También se ha sugerido que, en los planes de colonización de los países en desarrollo que ocasionan cuantiosos gastos, se deberían tener presentes los sistemas de explotación mixta.

Por otra parte, Douglas (citado por Apolo²) comenta que con el propósito de alcanzar un balance correcto, dentro de un contexto económico definido por las demandas de la agricultura, deben adoptarse complejas medidas, entre las que está el uso de árboles para mantener el equilibrio y hacer producir rentablemente las tierras más pobres. Los árboles podrían producir sustitutos de los cereales, forraje palatable para el ganado y muchos otros productos.

CUADRO 56: Comparación de opciones de uso para la "tierra firme" de la Amazonía brasilera.

Opción de uso	Criterios	Sustentabilidad agrícola	Sustentabilidad social	Auto-Suficiencia	Compatibilidad con otros usos	Efectos sobre otros recursos	Efectos macro-ecológicos
1.	Bosque natural	1	3	?	1-3	1	1
2.	Extracción de productos forestales	1	?	1	3	1	1
3.	Sistemas de dosel protector (<i>shelterwood</i>)	1	?	1	1-3	1	1
4.	Extracción selectiva con replante	1	?	1	1-3	1	1
5.	Extracción selectiva sin replante	2	?	3	1-3	1	1
6.	Enriquecimiento y/o envenamiento selectivo	1	?	1	1-3	1	1
7.	Plantaciones forestales	2	?	2	1-3	3	2
8.	Tala rara sin replante	3	3	3	1-3	3	2
9.	Cultivos perennes	2	1	1	1-3	3	2
10.	Sistema Taungya	2	1	1	1	3	2
11.	Agricultura migratoria de cultivos anuales	1-3	1-3	2	1-3	3	2
12.	Agricultura continúa con cultivos anuales	?	1	2	1-3	3	3
13.	Pastos con fertilizantes	2	3	3	3	3	3
14.	Pastos sin fertilizantes	3	3	3	3	3	3

a/ 1: buena; 3: mala; ?; desconocido.

FUENTE: Fernside ³²

La filosofía de los cultivos múltiples consiste en lograr una máxima producción por unidad de tiempo y área, con un mínimo deterioro de los recursos. La meta consiste en alcanzar una combinación de cultivos, cuya mutua compatibilidad haga posible una más eficiente utilización de los recursos principales: luz solar, suelo y agua (Payne⁴⁹, Soria *et al*⁷⁰).

Los cultivos que pueden mezclarse en una combinación compatible deben tener requerimientos ambientales y nutricionales esencialmente diferentes y, al mismo tiempo, características físicas y morfológicas también diferentes. Esto se puede aplicar, en buena proporción, al sistema árbol-pasto-cultivo.

Dicha filosofía sugiere que la agricultura está siguiendo el mismo camino de la industria: optimizar cada vez más los sistemas productivos para que redunden en una mayor eficiencia, con la ventaja de que, al parecer, las materias primas de la agricultura son inagotables: luz solar, agua, suelo y germoplasma. Los dos últimos deben merecer más cuidado al respecto.

Sin embargo, a pesar de las ventajas aparentes de los sistemas integrados, por ejemplo, sólo un dos por ciento de la ganadería tropical se maneja actualmente dentro de tales sistemas. Se ha calculado que, si la mitad del área total cultivada con cocoteros en todo el mundo se integrara con la ganadería de rumiantes, la producción de ésta podría incrementarse en un 25%, sin utilizar nuevas tierras (Payne⁴⁹). /

También existen dudas sobre si estos sistemas constituyen realmente una solución para aumentar la productividad de las tierras. Wadsworth⁷⁷, por ejemplo, expresa al respecto: "Unas prácticas llamadas agrosilvicultura . . . se han clasificado como un acercamiento a los ecosistemas naturales . . . seguramente cientos de mezclas de plantas han sido probadas por accidente o diseño durante la larga historia de la agricultura. ¿Podría ser que de todas estas prácticas ninguna sirvió para demostrar el valor, si lo tiene, que se puede atribuir a los sistemas naturales?" En otro escrito más reciente, el mismo autor (Wadsworth⁷⁸) critica acerbamente tales sistemas: "La literatura sobre agroforestal ha tendido hasta hace poco a asimilarse a los hombres ciegos que describen al elefante . . . Lo agroforestal acredita el escrutinio: ¿Acaso la integración árbol-cultivo horizontal, así como vertical, implica la inclusión de fondos hasta con un árbol dentro de ellos? ¿Merece mayor crédito esta diversificación de cultivos que es

**ALGUNOS EJEMPLOS DE
SISTEMAS AGROSILVOPASTORILES**

(Esbozo de F. Torres, Intern. Council for Research in Agroforestry, Nairobi, Kenya).

SISTEMA	FUNCION ARBOL		INTERACCION		DISTRIBUCION	
	P	S	T	E	I	Z
AG. SILV → SILV. PASTO.	✓		✓	✓	✓	
ESTRATIFICADOS	✓			✓	✓	
AGROSILVICOLA A SILVOPASTORIL						
ESTRATIFICADOS						

P : Producción
S : Servicios
T : Temporal
E : Espacial
I : Intercalada
Z : Zonal

FIG. 31. Algunos ejemplos de sistemas agrosilvopastoriles

FUENTE: Esbozo de F. Torres, Intern. Council for Research in Agroforestry, Nairobi, Kenya.

realmente única? ¿Son los árboles frutales realmente receptivos al rendimiento sostenido de la madera, o constituyen ellos horticu-
ra? ¿Se ha demostrado que los rendimientos de la madera prove-
niente de árboles interplantados son mayores que la pérdida de valor
ocasionada en el rendimiento alimenticio y de pastaje?"

Existen numerosos documentos que discuten sobre los sistemas
o prácticas agrosilvopastoriles (*agroforestry systems*) en inglés, sus
bondades y desventajas en Centroamérica y América Latina en gene-
ral (Bene *et al*⁷; Budowski^{10 11 12 13}; CATIE¹⁴; Combe y Budows-
ki¹⁶; Combe *et al*²⁰; Combe¹⁹; Beer *et al*⁶). Se recomienda a los in-
teresados consultar estos documentos, dentro de los cuales merece
destacarse la bibliografía compilada por Combe, Jiménez y Mon-
ge²⁰ y editada por el Centro Agronómico Tropical de Investigación
y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.

Al lector le diremos que la adopción de prácticas mejoradas de
los sistemas multi-estratificados, depende de los resultados que arroje
la investigación sistemática sobre la bondad de tales sistemas, en cuan-
to a su producción biológica, a la reducción efectiva de las tasas de
erosión y a la alternativa que brinden para mejorar la producción y
productividad de las tierras como sistemas estables.

DEFINICION DE CONCEPTOS

Sistemas agroforestales o agrosilvopastoriles

A menudo existe confusión sobre el concepto de sistemas o téc-
nicas agrosilvopastoriles entre los especialistas, ya que cada uno en-
tiende el concepto a su manera. El término anterior relaciona las
tres actividades: agrícola, ganadera y forestal. Se ha utilizado tam-
bién el título de **técnicas agroforestales**. Es evidente que cuando se
practican sólo dos (de las tres) actividades simultáneas o escalonadas
en un mismo sitio, el sistema de uso del suelo toma el nombre de ta-
les actividades: por ejemplo, silvopastoril, silvoagrícola o agrosilvíco-
la. Las Figs. 32, 33 y 34 ilustran el hecho. A continuación se rela-
cionan las definiciones más ampliamente aceptadas dentro del ámbi-
to agrosilvopastoril.

Técnicas agroforestales

Bajo este término se entiende el conjunto de técnicas de ma-
nejo de tierras que impliquen la combinación de árboles forestales

ALGUNOS EJEMPLOS DE
SISTEMAS AGROSILVICOLAS (Esbozo de F. Torres).

SISTEMA	FUNCION ARBOL		INTERACCION		DISTRIBUCION	
	P	S	T	E	I	Z
BARBECHO MEJORADO	✓	✓	✓			✓
BARRERAS VEGETATIVAS		✓		✓	✓	
ESTRATIFICADOS	✓	✓		✓	✓	

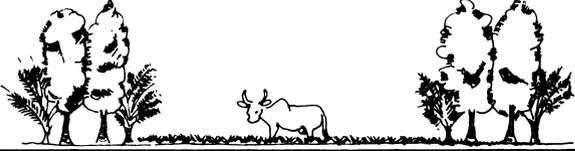
BARBECHO MEJORADO	
BARRERAS VEGETATIVAS	
ESTRATIFICADOS	

S : Servicios
 T : Temporal
 E : Espacial
 I : Intercalada
 Z : Zonal

FIG. 32. Algunos ejemplos de sistemas agrosilvícolas.
 FUENTE: Esbozo de F. Torres.

ALGUNOS EJEMPLOS DE
SISTEMAS SILVOPASTORILES (Esbozo de F. Torres).

SISTEMAS	FUNCION ARBOL		INTERACCION		DISTRIBUCION	
	P	S	T	E	I	Z
BANCO PROTEICO		✓	✓	✓		✓
CERCAS VIVAS	✓	✓		✓		✓
PASTIZAL ARBORIZADO		✓		✓	✓	

BANCO PROTEICO	
CERCAS VIVAS	
PASTIZAL ARBORIZADO	

P: Producción
S: Servicios
T: Temporal
E: Espacial
I: Intercalada
Z: Zonal

FIG. 33. Algunos ejemplos de sistemas silvopastoriles
 FUENTE: Esbozo de F. Torres.

con cultivos, con ganadería, o una combinación de ambos. Tal asociación puede ser simultánea o escalonada en el tiempo y en el espacio. Tiene como objetivo optimizar la producción por unidad de superficie, respetando siempre el principio del rendimiento sostenido (Combe y Budowski¹⁶).

Agroforestación

Constant (citado por Lagemann y Heuvelop³⁹) refiere la **agroforestación** a la "idea de utilizar los árboles como un componente del manejo global de los recursos del suelo, con el objeto de satisfacer las necesidades de alimento, energía, cobijo e ingresos de la gente. El sistema debe ser social, cultural y económicamente aceptable para maximizar la producción total, en un nivel dado de insumos, y minimizar el daño ambiental.

Las fincas pequeñas generalmente combinan diferentes actividades de producción (cultivos, árboles y ganado), de modo que el análisis de los sistemas de uso de la tierra contempla el estudio de los principales usos del suelo, los recursos empleados, la producción y la productividad (de las Salas y Fassbender⁶⁰; Lagemann y Heuvelop³⁹). El Cuadro 57 ilustra las funciones del componente forestal en diferentes sistemas del uso de la tierra.

Característica principal

A diferencia del sistema de agricultura migratoria, la característica principal de los sistemas agrosilvopastoriles es la estabilidad del uso del suelo y el aumento de la productividad por unidad de superficie, sin reducir la estabilidad ecológica.

Ventajas y desventajas

El objetivo de estas prácticas (llamadas también sistemas) es sacar provecho del asocio árbol-cultivo. Tal beneficio se traduce por ejemplo en las siguientes ventajas (Budowski¹³):

- aprovechamiento más eficiente del espacio;
- aporte y reciclaje de nutrimentos;
- sombra;
- producción de madera, leña y forraje;
- aumento de la materia orgánica por acumulación de hojarasca;

mejoramiento de la estructura del suelo y de la capacidad de absorción de agua, especialmente a través de las raíces profundas de las leguminosas;

uso más eficiente de los nutrimentos y del agua a diferentes profundidades, por parte de plantas con diferentes sistemas radicales;

mejoramiento de la protección del suelo y un mejor control de las malezas;

incremento en la resistencia a enfermedades.

Frente a estas ventajas, el mismo autor destaca también los efectos negativos de algunas de las combinaciones. Las principales son:

competencia por luz, energía, nutrimentos y agua;

daño a los cultivos en las operaciones de entresaca y cosecha de árboles;

proceso de mecanización más difícil;

efectos alelopáticos de un cultivo sobre un árbol o viceversa;

los sistemas de análisis económico que consideran no eficientes las combinaciones agroforestales, debido a su complejidad inherente.

CUADRO 57: Funciones del componente forestal en los sistemas agrosilvopastoriles

Técnicas de uso del suelo	Función	Especies forestales más comunes	Ejemplo más común
Sistema agrosilvícola	Producción (madera-leña)	<i>Cordia alliodora</i> <i>Eucalyptus spp.</i> <i>Cedrela spp.</i> <i>Albizia carbonaria</i> <i>Tabebuia spp.</i>	Cafetal con maderables; Maderables asoc. a la producción agrícola. (sistema Taungya)
Silvopastoril	Servicio (banco proteico, cercas vivas, sombra) Producción (madera-leña) Protección (contra la erosión, aumento de la fertilidad natural del suelo).	<i>Leucaena leucocephala</i> <i>Pseudosamanea quachapele</i> <i>Pithecellobium dulce</i> <i>Gilricidia sepium</i> <i>Erythrina spp.</i> <i>Prosopis juliflora</i> <i>Psidium guajava</i> <i>Alnus acuminata</i> <i>Acacia spp.</i> <i>Spondia mombin</i> <i>Pinus caribaea</i>	Pastizales con árboles de sombra y forrajeras. Cercas vivas en potreros. Frutales asoc. con pastos. Maderables con pastos.

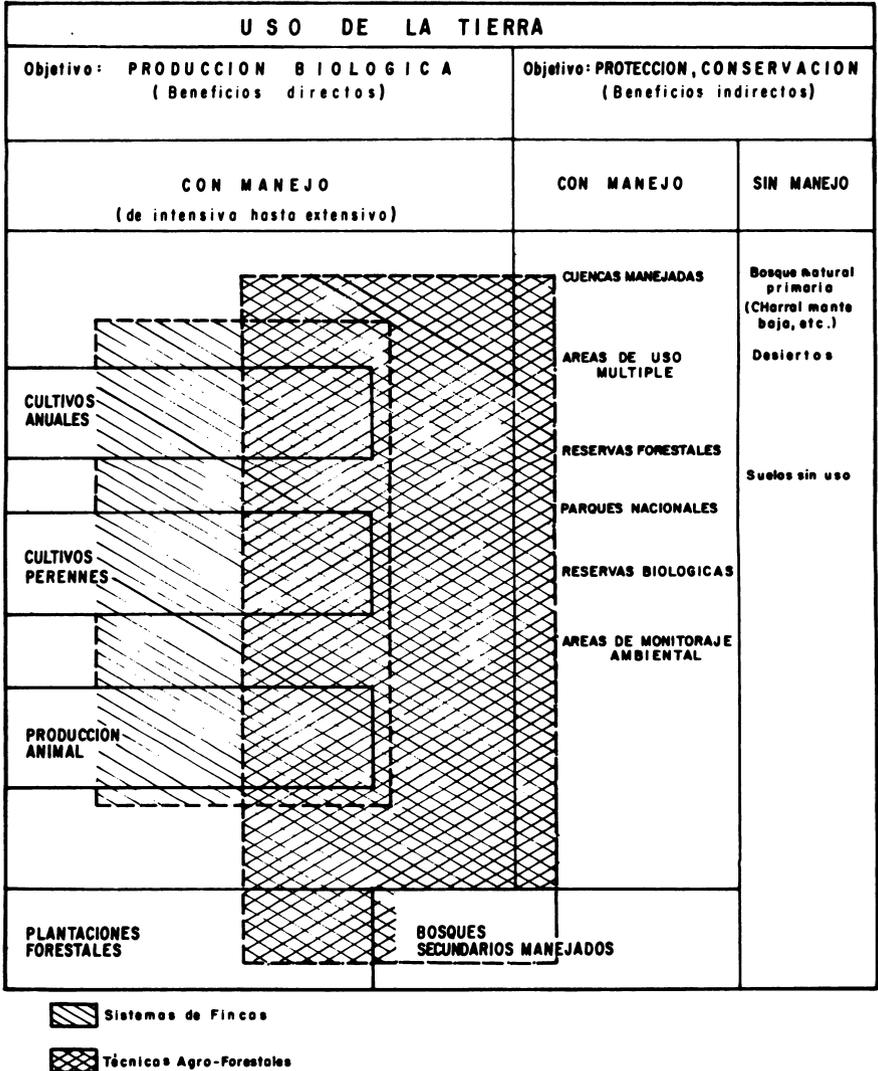


FIG. 34. Esquema de clasificación del uso de la tierra e impacto de las técnicas agroforestales.

FUENTE: Combe y Gewald¹⁵.

Incidencia de las técnicas agroforestales

Las técnicas agroforestales tienen una amplia incidencia sobre el uso de la tierra, como se desprende de la Fig. 35. La figura destaca el ámbito de las técnicas agroforestales en su interrelación con los principales sistemas de cultivo y con áreas naturales manejadas. Como se definió anteriormente, tales técnicas combinan árboles con cultivos y/o ganadería, en forma simultánea o temporal. Por eso, el espacio sombreado indica la relación existente entre los sistemas tradicionales, cuando se involucra el concepto de técnicas agroforestales. Se nota en la figura que más del 90% del espacio doblemente rayado, se ubica en el ámbito de los sistemas de cultivo y el resto tiene ingerencia en los sistemas naturales sometidos a algún tipo de manejo (en especial en las cuencas hidrográficas y las áreas de uso múltiple). La figura identifica también un impacto de las técnicas agroforestales en áreas tales como Reservas Forestales, Parques Nacionales, Reservas Biológicas y Areas de Manejo Ambiental; estas áreas, cuando están parcialmente colonizadas, pueden albergar sistemas agroforestales.

En muchos lugares del trópico se ha demostrado la posibilidad de incrementar la producción total, mediante la combinación de árboles con cultivos agrícolas y ganadería, y existen evidencias de que la agrosilvicultura también puede introducirse en tierra improductiva para la sola agricultura. Se requiere de la investigación sistemática para encontrar las combinaciones apropiadas a las diferentes condiciones de suelo y clima, y diseñar prácticas que sean aceptadas por la población local. El Cuadro 58 muestra los beneficios del asocio de frutales con cultivos anuales, en terrenos degradados y mejorados con la construcción de terrazas, en Honduras.

CUADRO 58: Costo y beneficio anual de naranjos con dos años, maíz y yuca, con tecnología intermedia, en Honduras (US\$/ha).

Año	Costos de naranjos	Cultivos maíz/yuca	Costos totales anuales	Ingresos totales anuales	Pérdida o Ganancia
1	78	748	1446	1150	-296
2	78	748	892	1150	258
7	195	---	196	741	545
8 - 20	218	---	218	919	701

FUENTE: Adaptado de Dongelmans²⁴.

Existe la creencia errónea de que los árboles demoran mucho tiempo para producir madera y frutos. El género *Leucaena* produce vainas a los ocho meses y, a los tres años, madera para leña o pulpa. Una plantación puede proveer anualmente hasta 50 toneladas de madera por hectárea, es decir, cinco veces el promedio de los pinos cultivados en regiones templadas (Pimentel *et al*⁵²). En Brasil, el *Eucalyptus* es cosechado a los cinco años para pulpa y constituye el mayor soporte de la industria forestal de plantaciones. Todos los árboles pueden utilizarse como combustible y normalmente aportan un excelente material de construcción. Algunas especies son forrajeras y los frutos de otras, como *Spondias mombin* y *Erythrina edulis* son consumidos por la población local.

Mediante el uso de tecnologías conocidas para la plantación de árboles con cultivos en los trópicos húmedos, la producción puede mantenerse, a la vez que se obtiene un beneficio adicional por la cosecha de madera. En Suriname, Vega⁷⁶ evaluó una alternativa de manejo agrosilvicultural para un período de 20 años. El Cuadro 59 resume los resultados:

CUADRO 59: Costo de inversión y beneficio para una hectárea de plantación de *Cordia alliodora*, asociada con cultivos en Suriname.

Edad (años)	Cultivos	Costo	Beneficio
		US\$/ha	
0.5	Arroz 1/		198
1	Banano		280
	Otros 2/		110
15	<i>Cordia alliodora</i> 3/		275
20	<i>Cordia alliodora</i> 4/	1178 a/	1856

a/ Plantación y mantenimiento del cultivo forestal del año 1 al año 20.

1/ 20 sacos de 50 kilos a US\$9.9/saco; 90 racimos de 16 kilos a US\$2.75.

2/ Calabaza, sandía, tomate, pimienta, piña.

3/ Cosecha intermedia: 50 m³/ha.

4/ Cosecha final: 225 m³/ha.

FUENTE: Adaptado de Vega⁷⁶.

Se necesita lograr resultados y difundir la información, iniciar programas de demostración y producir árboles de buena calidad en los viveros.

El estudio e instrumentación de las técnicas agrosilvopastoriles deberán ser analizados en cada caso, en términos de estabilidad agrícola y social, nivel de autosuficiencia traducida en bienes localmente producidos y efectos sobre otros recursos.

Clasificación de las técnicas agroforestales

Combe y Budowski¹⁶ identificaron tres niveles de clasificación de las técnicas agroforestales, según los tipos de cultivos, la función principal del componente forestal y la distribución del árbol en el tiempo y en el espacio. Tal esquema se muestra en el Cuadro 60. Se espera que los sistemas agroforestales permitan la productividad sostenida en terrenos marginales, en los que entran en juego factores ecológicos y socio-económicos. Gracias a tradiciones, infraestructura, suelos y climas, existen en el trópico dos o más tipos de combinaciones y formas de manejo de los sistemas agroforestales.

Reconocimientos detallados de varios estudios de caso, mostraron que las fincas utilizan árboles por razones económicas, en forma de cercas vivas, en pastizales y como sombra en combinaciones con café y cacao (Avila *et al*⁴; Beer *et al*⁶; Lagemann y Heuveldop³⁹; de las Salas⁶²). Debido a que los cafetales y cacaoales son económicamente los más importantes y a que las tierras de pastoreo son causantes de los problemas más severos de erosión, se seleccionaron, para ilustración, en conjunto con las cercas vivas, estos tres sistemas como los más representativos de las condiciones ecológicas y socio-económicas de las regiones de ladera de América Tropical.

CUADRO 60: Esquema de clasificación de las técnicas agroforestales.

CRITERIOS Y NIVELES DE CLASIFICACION

1o. Tipos de cultivos que se combinan	Arboles con cultivos Sistemas silvo-agrícolas	Arboles con cultivos y pastos Sistemas agro-silvopastoriles	Arboles con pastos Sistemas silvopastoriles
2o. Función principal del componente forestal	P = Producción P + T = Protección y servicios		
	P P + T	P	P + T P P + T
3o. Repartición del componente forestal a través del tiempo y en el espacio	TIEMPO T = Temporal P = Permanente		
	T P T P	T P T P	T P T P
Repartición Regular ESPACIO	Repartición Regular		

FUENTE: Según Combe y Budowski¹⁶

Café con árboles

Las técnicas tradicionales, con variedades viejas y una mezcla diversa de árboles maderables y frutales, representan el caso más común, donde la finca promedio puede medir alrededor de las 10 hectáreas.

A pesar de que, en general, el café produce mejores rendimientos anuales en plantaciones puras, con manejo intensivo (y los finqueros lo saben), en la mayoría de las fincas, los cafetos están combinados con una especie arbórea (al menos) para sombra. Esta situación también se presenta en plantaciones nuevas.

La estructura típica de estos sistemas tiene tres estratos verticales (Lagemann y Heuvelodop³⁹; de las Salas⁵⁹; Budowski¹⁰) (Fig. 36):

- El primer estrato son los cafetos;
- El segundo estrato lo constituyen árboles de sombra como *Erythrina glauca* y *E. edulis*; frutales como *Citrus* spp, *Musa* spp y *Mangifera indica*; o especies de doble propósito como *Inga* spp, *Albizia carbonaria*, *Tabebuia rosea* y *T. guayacán*.
- El tercer estrato contiene árboles maderables de *Cedrela* spp, *Cordia alliodora*, *Jacaranda caucana*, *Gliricidia sepium* y frutales como *Spondias purpurea*, *Psidium guajaba* y *Mangifera indica*.

Cuando se utilizan técnicas modernas de manejo, la distribución horizontal es bastante regular y el número de especies asociadas es relativamente bajo. Lo contrario se da en el caso de sistemas con técnicas tradicionales.

Las combinaciones de cultivos y árboles, en los tres grupos descritos a continuación, se encuentran comúnmente en Costa Rica (Lagemann y Heuvelodop³⁹) y Colombia (De las Salas^{59,62}).

a) Café asociado con árboles maderables

Las especies maderables más importantes identificadas en las fincas son: *Inga* spp, *Gliricidia sepium*, *Jacaranda caucana*, *Astronium graveolens*, *Tabebuia rosea*, *T. guayacan* y *Cordia* spp.

Existen grandes variaciones en las combinaciones café-árboles maderables, desde el punto de vista de estructura (densidad, distribu-

ción, diversidad); tipo de manejo (regeneración, método de cosecha, podas, fertilización) y objetivos del propietario (reserva financiera, fuente de ingresos, consumo familiar). La importancia de estos parámetros depende de las condiciones locales; pero, en general, estas combinaciones son más comunes en fincas relativamente grandes, en las que los propietarios no dependen de la recuperación inmediata de sus inversiones.

b) Café asociado con árboles para propósitos múltiples

Otros bienes y servicios importantes derivados de los árboles son: sombra, leña, frutas y producción de miel. No es común encontrar árboles medicinales. Las especies arbóreas de multipropósito más frecuentes son: *Erythrina spp*, *Citrus spp*, *Inga spp*, *Gliricidia sepium*, *Mangifera indica*, *Pithecellobium dulce*, *Spondias purpurea*, *Psidium guajaba*, *Annona muricata*, *Annona spp*, *Pseudosamanea guachapele*.

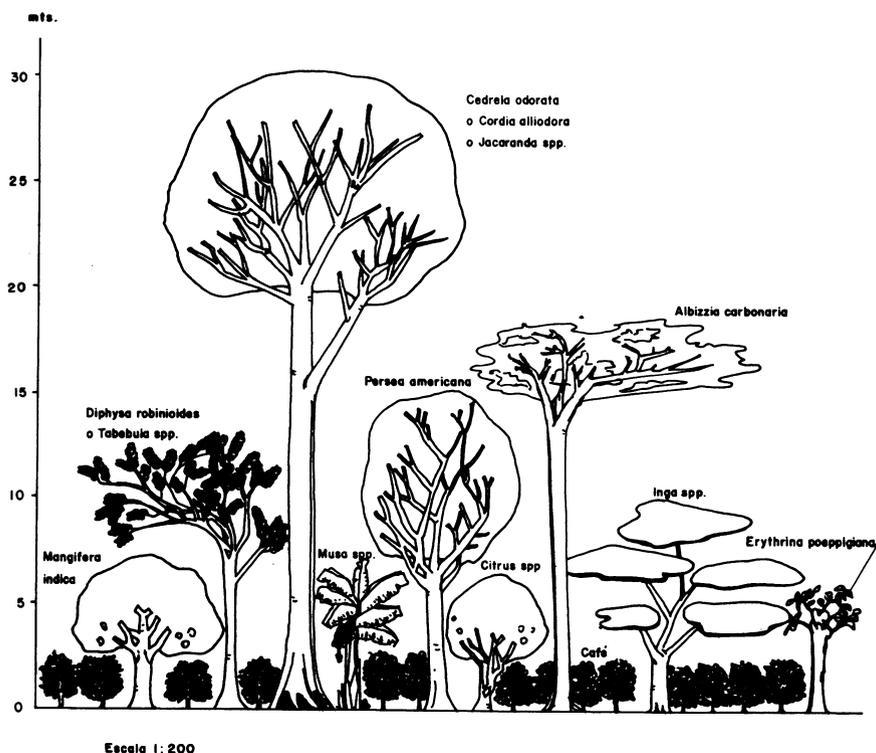


FIG. 35. Estructura vertical típica en combinaciones de café-árboles de sombra en zonas cafeteras de América Tropical.

FUENTE: Esbozo original de L. Espinoza³¹, adaptado.

Cafetales con variedades mejoradas se combinan con sólo una o dos de las especies mencionadas arriba o con ninguna, mientras que cafetales con variedades tradicionales combinan un número grande de especies arbóreas (Espinoza³¹). En Costa Rica, se podan las ramas de *E. poeppigiana* dos veces al año, en cafetales bajo sombra de esta leguminosa (280 árboles/ha). Las ramas y hojas brindan una fuente significativa de materia orgánica al suelo. El aporte puede alcanzar hasta 10 t/ha/año (Russo⁵⁶). De este peso, unas cuatro toneladas corresponden a las hojas, las cuales tienen un contenido de nitrógeno superior al cuatro por ciento.

Russo⁵⁸ encontró que la poda afecta la nodulación, sucediéndose el desprendimiento de nódulos y la muerte de raicillas. Este autor comprobó que, a los tres meses de la poda, en los árboles podados se redujo el número y el peso seco de los nódulos en más del 50%, mientras que en los no podados no hubo diferencias significativas. Después de seis meses de haber podado, se observó un aumento en el número y peso de los nódulos, en niveles similares a los observados antes de la poda, mientras que en árboles no podados se mantuvo el nivel.

c) Café asociado con todo tipo de árboles

Este sistema de producción altamente diversificado constituye el tipo tradicional, frecuente en las fincas más pequeñas, en las áreas económica e infraestructuralmente menos desarrolladas. La mayor parte de los productos derivados de estas especies es consumida en la misma finca o vendida localmente a intervalos irregulares (Espinoza³¹; Lagemann y Heuvelop³⁹; De las Salas⁶²).

Pastos con árboles

Algunos ganaderos del trópico son conscientes de la importancia de mantener especies forestales que provean forraje y sombra a sus animales. Las más comunes son: *Erythrina glauca*, *Erythrina poeppigiana*, *Leucaena leucocephala*, *Gliricidia sepium*, *Guazuma ulmifolia*, *Psidium guajaba*, *Samanea saman*, *Hymenaea courbaril* y *Cecropia spp.* Los beneficios de *Erythrina poeppigiana*, como mejoradora del suelo en los sistemas agroforestales, han sido reseñados por varios autores (Deccaret²²; Molleapaza⁴¹; Russo⁵⁷). Ruiz⁵⁵ comenta sobre otros estudios no publicados del CATIE, según los cuales los valores de riqueza proteica son del orden de 20 a 24%; la digestibili-

dad del forraje, de un 65%, y el consumo voluntario en cabras y ovejas de raciones basadas en este material, corresponde al 3.5% del peso vivo animal. Los resultados sobre el valor y uso nutricional de forrajes, a partir de especies forestales (el caso de *Leucaena* está suficientemente documentado), parecen indicar que es técnicamente factible el desarrollo de sistemas eficientes que integren la silvicultura y la ganadería (Ruiz⁵⁵).

El efecto en la producción de pasto, bajo leguminosas arbóreas, no es suficientemente conocido. El Cuadro 61 contiene algunos datos a manera de ilustración.

CUADRO 61: Producción de pastos bajo árboles leguminosos y no leguminosos.

Especie	Producción g/m ² (mat. seca)	Nitrógeno en el suelo (%)	
		0 - 20 cm	20 - 40 cm
<i>Erythrina poeppigiana</i> (L)	639	0.35	0.15
<i>Pithecellobium saman</i> (L)	720	0.38	0.18
<i>Gliricidia sepium</i> (L)	639	0.32	0.18
<i>Cordia alliodora</i> (NL)	752	0.25	0.15
Control	750	0.28	0.16

(L): Leguminosa; (NL): no leguminosa.

FUENTE: Deccaret²².

Del Cuadro puede deducirse que las leguminosas no aumentaron la producción de pastos, comparada con la no leguminosa y el control; por el contrario, el control sobrepasó todas las leguminosas y arrojó un valor igual al de la no leguminosa. Obviamente, los tenores del nitrógeno del suelo fueron mayores bajo las especies leguminosas, sobre todo en la primera capa (0-20 cm). Estudios similares merecen ampliarse para cuantificar los beneficios del asocio pastobol.

Algunos ejemplos

Un ejemplo muy conocido sobre la combinación de pastos naturales (*Pennisetum clandestinum*) y de corte (*P. purpureum*; *Axonopus scoparius*) con una especie forestal maderable y no leguminosa —aliso (*Alnus acuminata*)— se encuentra en las regiones elevadas (2500 m; 2000-3000 m) de producción lechera en Costa Rica. Muchos finqueros dicen que la producción de forraje bajo árboles aumentó. El espaciamiento de los alisos en los potreros puede fluc-

tuar entre $8 \times 8 \text{ m}^2$ y $15 \times 15 \text{ m}^2$. En Colombia se conoce el mismo caso en la Cuenca del Río Blanco, Manizales, en donde el crecimiento del aliso (*Alnus jorullensis*) es inferior (18 cm de diámetro a los siete años) (Smit^{6 9}), al reportado por Fournier^{3 3}, en fincas cafeteras de Costa Rica (21 cm de diámetro a los cinco años), y el citado por Combe^{1 7} para zonas de producción lechera del mismo país (incremento promedio en diámetro: 3 cm/año).

La importancia del aliso en pastizales radica en su capacidad de fijar nitrógeno en sus nódulos radicales, en simbiosis con bacterias del género *Frankia*. Rodríguez^{5 3} comprobó que plantitas de aliso de seis meses y medio contenían un promedio de 60.5 mg de N total con esta simbiosis, contra 0.7 mg sin ella, es decir, 356 veces más. Otros estudios en España (Bermúdez de Castro, citado por González^{3 4}) comprobaron que el *Alnus* puede fijar tres veces más nitrógeno/ha/año que gramíneas forrajeras tropicales (325 y 99 Kg N₂/ha/año, respectivamente). Se presume, entonces, que esta propiedad puede ser una ventaja indirecta que beneficie la producción de forraje en potreros. Desde este punto de vista, los efectos positivos serían, entre otros, la recirculación del nitrógeno y la regulación de la humedad del suelo. Por otra parte, el árbol de aliso representa un ingreso directo en madera y leña muy importante para el agricultor. Siendo una especie nativa de rápido crecimiento y hábito colonizador, su madera es apreciada también para trabajos de carpintería.

En Colombia es común el caso de finqueros que han reforestado sus pastizales para aprovechar la madera, mantener el suelo protegido, disminuir los costos de limpieza y mantener limpio al ganado de garrapatas (una condición que no se da en potreros no arbolados). Los casos más comunes son coníferas con pastos o frutales con pastos. Es interesante citar, aquí, el caso de un finquero que reforestó 43 hectáreas (simultáneamente con la siembra de pastos) con *Pinus patula*, *Pinus oocarpa*, *Pinus kesiya* y *Cupressus lusitanica*, a 1800 m, 18°C y 2000 mm de lluvia/año. Introdujo ganado de doble propósito en praderas abiertas, a 2400 m s.n.m. y 13°C, adaptándose éstos a su nuevo ambiente y conviviendo con las coníferas, desde que los arbolitos tenían entre 12 y 15 meses (Ayerbe⁵). Hoy, en 1983, los lotes de reforestación más antiguos tienen nueve años y el dueño ha tenido ingresos por venta de madera (entresacas) para pulpa, del orden de los US\$24 000, lo cual le ha servido para amortizar el préstamo para la reforestación. La capacidad de carga actual de estos potreros arbolados (pasto *Brachiaria*) es de 0.7 animales por hectárea, con suplemento de pasto de corte y sal mineralizada.

En un ámbito más amplio, cabe mencionar el programa de pastizales reforestados en Nueva Zelandia y Australia. Combe¹⁸ comenta que extensas superficies de praderas se reforestaron con *Pinus radiata*, pero continuaron utilizándose para pastoreo. De acuerdo con la calidad del suelo, se plantan entre 800 y 1200 árboles/ha. Dos años después de plantar, se cosecha el pasto; después se pastorea el terreno. Los árboles se podan y los rodales se entresacan periódicamente. En etapas de rotación de 25 años, se obtiene un volumen de madera de 637 m³/ha. La carga animal recomendada es de 12 a 25 ovejas/ha. Se ha podido establecer que la combinación silvo-pastoril produce un ingreso neto significativamente más alto, especialmente en fincas grandes. En fincas pequeñas, el sistema no fue rentable.

Un caso insólito no puede dejar de citarse aquí: en Jari Florestal*, la poderosa empresa en la Amazonía del Brasil, se introdujo el pasto kikuyo en las 20 000 hectáreas de pino caribe (*Pinus caribaea*), principalmente para bajar los exorbitantes costos del control de malezas. El pastoreo extensivo en estas plantaciones produjo cerca de 50 Kg/ha/año de carne de res. Mientras que, por una parte, se redujo el crecimiento del pino en un cinco por ciento, por la otra, los ahorros en el control de malezas después de dos años fueron suficientes para pagar el establecimiento de los pastos y las cercas (Hetsch³⁵). Briscoe⁹ comenta que escogieron los suelos arenosos para la reforestación con pino, asociándolo con *Panicum maximum*, *Brachiaria humidicola* y *green panic* (*Panicum maximum* var. *trichoglume*) y pastoreo de 5800 cabezas de ganado. Conviene aclararle al lector que la función de Jari Florestal y Agropecuaria no se reduce solamente al caso silvopastoril comentado; es un complejo industrial de 100 000 hectáreas de plantaciones (*Gmelina arborea*, *Eucalyptus deglupta*, *Pinus caribaea*, var. *hondurensis*), ganado, arroz, cerdos, cultivos anuales (maíz, frijol) y perennes (cacao, castaña de Pará), y minería (caolín, bauxita).

Otros ejemplos mucho más conocidos que los anteriores, se refieren a los sistemas poliestratificados. Por lo general se trata de café o cacao con uno o dos estratos de árboles. Probablemente, la especie forestal más difundida en estos sistemas de producción es *Cordia alliodora*, que crece en asocio con una amplia variedad de cultivos y pastos tropicales en América Tropical, sobre un millón de hectáreas (Peck⁵⁰). El Cuadro 62 ilustra el caso.

* Precipitación: 2200 - 2500 mm/año; temperatura: + 24°C.

CUADRO 62: Distribución de *Cordia alliodora* establecida por regeneración natural, asociada con cultivos agrícolas en los neotrópicos húmedos.

País	Localidad	Cultivo (s)	Extensión aprox. (km ²)
Colombia	Tumaco	Cacao, plátano	500
	Región Andina	Café	1500
Panamá	Bocas del Toro	Cultivos anuales, pasto y cacao	500
Ecuador	San Lorenzo	Cacao, plátano y pastos	500
	Santo Domingo de los Colorados	Cacao, pastos y banano	1000
	Oriente Napo	Cultivos anuales y perennes, pastos	500
Suriname		Cacao, banano y cultivos anuales	50
Venezuela		Café, banano, cacao, banano	500
			500
Costa Rica	Limón, Cahuita	Cacao	1000
	San Carlos	Pastos y plátano	1500
	Turrialba	Café, caña, pastos	500
América Central		Café, pastos, cacao	450
Brasil	Boa Vista	Bosques secundarios	1
	(Fordlandia)		10 101

FUENTE: Peck⁵⁰.

El *Cordia alliodora* provee en cafetales y cacaotales una fuente adicional de ingresos al agricultor, especialmente en Colombia, Costa Rica y Ecuador, en donde las trozas sin procesar pueden venderse entre US\$10 y US\$20/m³. Mediciones realizadas en Costa Rica y Colombia indican que esta especie, asociada con café y cacao, alcanza un volumen comercial de 100 a 250 m³/ha en un período de 20 a 25 años (Peck⁵⁰; de las Salas⁶¹; Rosero y Gewald⁵⁴; Escobar y Del Valle³⁰). Remijin y Wilderink, así como Alpízar *et al* midieron en Turrialba, Costa Rica incrementos promedio entre 3.2 y 3.6 cm/año para diámetro y entre 0.7 y 2m/año para altura de *C. alliodora* en socios experimentales con pasto, café y cacao.

Arboles forrajeros

Existe una gran variedad de árboles utilizados como forraje, en el mundo sub-tropical, en las regiones áridas y semi-áridas. Su utilización siempre fue esencial en la producción y levante de ganado en Africa Tropical, el nordeste brasileño y Asia. Hetsch³⁵ comenta que

el desarrollo de la ganadería en la Amazonía, generalmente ha subestimado las fuentes arbóreas de calorías y proteína para los animales, a pesar de la importancia de los arbustos para la dieta animal (más del 64% de la proteína en la estación seca) en pastizales naturales, tales como el Cerrado del Brasil. La tendencia de los organismos de investigación ganadera, en Sudamérica, de trabajar principalmente con pastos mejorados y leguminosas herbáceas, y únicamente con arbustos extraordinarios como *Leucaena* y guandul, ha desembocado en el descuido de árboles potencialmente iguales o mejores como fuentes de forraje. Existe una extensa variedad de especies nativas en el Amazonas que son palatables por el ganado; y otras numerosas especies forrajeras, conocidas en Africa y en Asia y aun en los Trópicos americanos, se están usando desde tiempos recientes, inclusive para mejorar sitios degradados. La especie leguminosa *Leucaena leucocephala*, considerada casi como un "árbol milagro", ha sido reseñada inclusive en un libro de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (NAS⁴⁴).

Se sugiere a los interesados consultar la obra. Aquí anotaremos como dato relevante que es difícil adaptar la especie a sitios muy ácidos, donde debe establecerse por medio de plántulas. Investigaciones en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), han logrado un alto porcentaje de sobrevivencia en viveros. La variedad gigante, comúnmente llamada en Centroamérica *Ipil-Ipil*, es nativa de El Salvador y se ha utilizado en forma promisoría para recuperación de suelos muy degradados del noreste del citado país (de las Salas *et al*⁶⁴). Una limitación para su uso indiscriminado es que produce la mimosina, sustancia que, si se acumula en el organismo del ganado en cantidades excesivas, produce la caída del pelo. Otra especie forrajera ampliamente usada es el *Cajanus cajan* (Guandul). Esta especie ha sido reportada en varias publicaciones. Ruiz (comunicación personal) comenta que no es tan apetecida por el ganado como la *Leucaena*, pero se establece fácilmente en mezcla con pasto sembrado, en los potreros de trópico húmedo americano. Se ha reportado (Hetsch³⁵) como tolerante al fuego, por lo cual esta propiedad es ventajosa en sabanas tropicales sometidas continuamente a quemas. Otras especies arbóreas relevantes, en el sentido discutido, son: *Acacia auricoliformis*, varias especies del género *Albizia*, *Sesbania grandiflora*, *Acacia mangium*, *Acrocarpus fraxinifolius*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Calliandra calothyrsus*, varias especies de *Schizolobium* y otras más, reportadas en un excelente estudio (NAS⁴⁴). Como otras especies colonizadoras, éstas tienen además las siguientes ventajas: crecimiento rápido, lo cual las habilita para com-

petir con las malezas invasoras; adaptabilidad a un amplio rango de sitios y suelos, particularmente suelos deficientes en nutrientes y sitios marginales inapropiados para cultivos alimenticios; una copiosa semillación en estados relativamente tempranos; habilidad para rebrotar por tocón; una madera generalmente liviana y también un carácter rústico. Adicionalmente, los árboles pequeños colonizadores ocurren, a menudo, en plantaciones puras, de un modo natural, lo cual indica que probablemente pueden establecerse en monocultivos, sin ser diezmados por hongos o insectos. Cuando se añade la ventaja de que son fijadores de nitrógeno, estas leguminosas pueden considerarse como árboles que ofrecen un excelente campo explo-

CUADRO 63: Árboles forrajeros con beneficios subsidiarios para sistemas agroforestales

Especies	Forraje		Mejora- miento del suelo	Sombra	Prod. de ma- dera constr.		Observaciones
	Frutos	Follaje			leña		
<i>Acacia albida</i>	X	X	probable	moderada	X	X	retoña por tocón, tolera pastoreo.
<i>Albizia lebbek</i>		X	probable	moderada	X		regenera rápidamente; follaje con alto contenido de N.
<i>Brosimum alcastrum</i>	X	X	probable	moderada			regenera rápidamente.
<i>Cassia spectabilis</i>	X	X	probable	ligera			-----
<i>Cajanus cajan</i>	X	X	probable	ligera			puede servir como fuente de alimento humano.
<i>Desmanthus virgatus</i>		X	?	moderada			tolerante a pastoreo intensivo; follaje contiene N.
<i>Enterolobium schomerikii</i>		X	?	ligera			-----
<i>Leucaena leucocephala</i>	X	X	sí	ligera	X	X	niveles altos de mimosina; no tolera suelos ácidos; crecimiento rápido.
<i>Prosopis pallida</i>	X		probable	ligera	X		-----
<i>Plthecellobium saman</i>	X		sí	ligera			-----
<i>Parkia sp</i>		X	?			X	-----
<i>Sclerolobium paniculatum</i>		X	probable	moderada		-	-----
<i>Stryphnodendron pulcherrimum</i>	X	X	probable	moderada		X	tolerante al fuego
<i>Sesbania grandiflora</i>	X	X	probable	moderada	X	X	cercos vivos, abonadura verde.

FUENTE: Hetsch³⁵.

ratorio para la investigación. El Cuadro 63 relaciona un número de especies que proveen un follaje que es alimenticio y/o semillas que han sido utilizadas en sabanas de pastizales en Sur y Centroamérica. Vale la pena anotar dos recientes publicaciones dedicadas a un par de especies utilizadas como forrajeras: *Acacia mangium* y *Caliandra*. Ambas publicaciones fueron auspiciadas por la National Academy Press⁴⁵.

El sistema integrado de producción agroforestal

Esta técnica de utilización de la tierra se denomina sistema integrado de producción estratificada agroforestal, dada su afinidad con el bosque tropical húmedo. Dicha técnica de utilización de la tierra se apoya en una figura ilustrativa (Fig. 37), que permite manejar las etapas dinámicas del establecimiento de una alternativa agroforestal (Dubois²⁵). El mencionado autor comenta que el modelo sugerido se practica de la siguiente manera: inicialmente se puede partir del sistema tradicional de agricultura de pancoger, es decir, desmonte, quema y cultivos de especies de ciclo corto, de acuerdo con uno u otro de los métodos de rotación del sitio en donde se desee aplicar el esquema. Los componentes dominantes del futuro esquema estratificado permanente son producidos en el transcurso de los cultivos de ciclo corto (arreglo cronológico). En el ejemplo escogido por el autor, se trata de la palma chontaduro —Pejibaye, en Costa Rica (*Bactris gasipaes*)—, bananos, cacao (o aguacate), café (o frutal de pequeño porte). Una vez completado el ciclo de cosecha de los cultivos de ciclo corto, los componentes perennes o semi-perennes estarán ya alcanzando un estado eficientemente consistente para introducir cosechas, con el objeto de formar el piso inferior del sistema. Estos cultivos, en el caso de la Amazonía, serían *Xanthosoma spp*, *Colocasia spp*, *Cajanus spp*, *Maranta arundinacea* y otros, de acuerdo con las necesidades y las tradiciones. Rápidamente se establecen tres, hasta cuatro estratos bien definidos, lo cual resulta en un conjunto poli-estratificado, bastante autosustentado y, por su estructura y composición, muy similar al ecosistema forestal. En estrecha dependencia con las especies elegidas, el sistema resultante puede orientarse hacia una economía puramente de subsistencia o hacia una economía de mercado. Dubois²⁵ sugiere las siguientes alternativas para perfeccionar el sistema descrito.

1. Agilizar métodos de inoculación de esos sistemas, por medio de hojarasca del bosque natural, con el objeto de maximizar la recirculación de nutrimentos y obtener o aproxi-

marse a una agricultura que esté al alcance del campesino de escasos recursos, el cual difícilmente puede adquirir abonos químicos.

2. Seleccionar y difundir entre los campesinos variedades y clones de calidad superior.
3. Introducir especies alimenticias o nuevas variedades de otras regiones tropicales similares, como componentes potenciales de estos sistemas estratificados adaptados a condiciones pantanosas.
4. Impulsar investigaciones orientadas hacia el aprovechamiento de especies relativamente umbrófilas (por ejemplo, ipecacuana), particularmente en lo que se refiere a variedades con esta característica, relacionadas con especies alimenticias, plantas de interés potencial para la producción de fármacos, colorantes naturales y aceites esenciales.

Valga mencionar que, en la región del Bajo Calima, Colombia (27°C, 7600 mm, lluvia/año), la Corporación Nacional de Investigaciones Forestales (CONIF) viene trabajando desde hace varios años en un programa agroforestal con comunidades nativas. El programa consiste, esencialmente, en ensayar especies nativas de la zona (frutales y árboles), con el objeto de desarrollar una tecnología apropiada a las condiciones socio-económicas y al ambiente biofísico del nativo. En ese sentido, es importante mencionar el programa de "Ensayos de Maderables Asociados a la Producción Agrícola". Los maderables más importantes son laurel (*Cordia alliodora*), peine mono (*Apeiba membranacea*) y cedro (*Cedrela spp*, varias procedencias). Los cultivos de común uso por los nativos son: yuca (*manihot esculenta*), plátano, (*Mussa spp*), chontaduro (*Bactris gasipaes*). Este no es en sí un cultivo de ciclo corto, pero es la base de alimentación de la población nativa. Se recurre, asimismo, a frutales como borojó (*Borojoa patinoi*) y caimito (*Lucuma spp*). Los resultados de estos ensayos están siendo evaluados por CONIF.

El Método taungya

Este es un método muy antiguo en el trópico húmedo, tanto americano como asiático y africano, y está extensamente documentado (ver por ejemplo: King³⁸; Watters⁷⁹). Se lo considera como una alternativa o una estrategia para cambiar el uso de la tierra, sobre

todo en áreas de intensa presión sobre ella (áreas de colonización). Consiste básicamente en la plantación de especies forestales, intercalando cultivos agrícolas de subsistencia. Antes de la plantación se limpia y quema el terreno, con el fin de habilitarlo para la siembra. Después de cosechar, el terreno queda ocupado únicamente con los árboles plantados. Cuando se cosecha la madera, se repite el mismo proceso. Muchas plantaciones de teca y caoba, en Asia y Africa, se han desarrollado usando esta técnica. En el trópico húmedo americano se ha practicado en Trinidad, Suriname, Costa Rica, el Caribe y, experimentalmente, en Colombia y Perú (Hetsch³⁵). Como alternativa de compromiso en zonas de agricultura migratoria de fuerte presión sobre la tierra, se utiliza con las ventajas siguientes: a) los residuos del rastrojo quemado y limpiado pueden ser aprovechados como leña y carbón por los colonos; b) los costos de establecimiento y limpieza de la plantación forestal se compensan con el valor de la cosecha agrícola; c) algunas malezas controladas, así como las raíces de los cultivos agrícolas que dependen de hongos micorrícicos, pueden mantener un reservorio de estos hongos, benéficos para las plántulas forestales (Janos, citado por el National Research Council). En Belice, se han establecido plantaciones de teca, pino caribe y Gemelina, con base en este sistema. Recientemente en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Costa Rica, se han establecido parcelas experimentales como maderables (*Cordia alliodora*, *Gmelina arborea*, *Eucalyptus deglupta* y *Terminalia ivorensis*), según Combe y Gewald¹⁵). Las últimas cuatro especies y el pino caribe han mostrado una excelente adaptación a áreas con alta precipitación (2000 - 4000 mm) y a elevaciones de hasta 1200 m. Los cultivos asociados utilizados han sido: maíz, frijol, caupí y frijol trepador. Budowski¹⁰ comenta que se están desarrollando una serie de programas dirigidos a la conversión de extensas áreas de tierras degradadas, en toda la América Central, la República Dominicana y Haití, para convertirlas en plantaciones maderables. Cientos de finqueros están a la expectativa de ser involucrados en estos programas, que les permitirán combinar sus cultivos alimenticios con plántulas de valor comercial en dos o tres años y, a la vez, participar en las operaciones de mantenimiento y cosecha. Esperan, también, un cambio gradual en el uso de la tierra, hacia un uso no destructivo, como es el forestal. Budowski¹⁰ comenta, además, que los precios cada vez mayores de la madera para leña, postes o madera comercial y pulpa, y las posibilidades de producir eventualmente fuentes baratas de biomasa sobre tierras hasta ahora no utilizadas, no competirán con los cultivos agrícolas y han generado hasta ahora mucho interés en las agencias

auspiciadoras de tales programas. En Costa Rica, la introducción del pino caribe hace 20 años y la aceptación, por parte de los finqueros, en plantar pequeños lotes, ha conducido al establecimiento de pinos de otras especies y al pastoreo eventual en estas plantaciones bajo condiciones controladas, hasta el momento a escala experimental. Naturalmente, semejantes proyecciones necesitan investigarse a la luz de los problemas del uso de la tierra, de los incentivos gubernamentales, de los proyectos económicos a largo plazo, de la aceptación de los finqueros y de una cuidadosa planificación de las relaciones entre las industrias madereras y los finqueros locales participantes en los programas. No hay espacio, en este capítulo, para referirnos extensamente a este sistema de utilización del suelo. Remitimos a los interesados a los estudios realizados por varios autores, de los cuales dos de ellos fueron mencionados.

Arboles y arbustos para producción de energía

Aunque el tema del uso del bosque para producción de energía ha sido profusamente documentado (ver por ejemplo: Earl²⁶; Eckholm^{27,28}; Deudney y Flavin²³), sigue siendo motivo de controversia dentro de los forestales clásicos y los planificadores del uso de la tierra en los trópicos. La utilización de árboles para objetivos sociales ha introducido en la silvicultura un nuevo concepto: la llamada **silvicultura social**, que incluye la agroforestal. Esta nueva modalidad del uso de la tierra ha sido atacada por autoridades como Wadsworth⁷⁸, quien la cataloga como una nueva moda, para plantearle al pobre falsas expectativas. Zobel⁸⁰ argumenta que los problemas relacionados con los aspectos de oferta de energía, para conversión en diferentes formas (gas, líquidos, sólidos, o destinados al uso directo, como combustible en las casas), son ampliamente diferentes; pero caracteriza el uso de los bosques para leña como una cosa tecnológicamente más simple y le da la mayor importancia a los árboles como productores de energía, debido —entre otras— a las siguientes razones:

- a. los bosques cubren una gran parte de la superficie terrestre y son un recurso renovable de plantas;
- b. los árboles crecen en tierras que a menudo son propias para otro tipo de cosechas, en lo referente a la necesidad de nutrientes y a la estructura del suelo. Adicionalmente, los árboles pueden plantarse con éxito en topografías que no permiten normalmente cosechas agrícolas (por lo

- menos, rentables). Los bosques producen además una gran cantidad de biomasa que, generalmente, no compete en relación con la producción de cosechas agrícolas. Si se manejan correctamente sobre una base de uso múltiple del suelo, los árboles pueden desarrollarse en una forma compatible con otros usos del bosque, tal como la vida silvestre, la estabilización de los suelos, la conservación del agua y, sobre todo, el mejoramiento de la estética del paisaje;
- c. los árboles y arbustos almacenan el producto de la conversión de la energía solar en el tronco, de tal modo que se puede cosechar a medida que se necesite;
 - d. el producto es durable y puede mantenerse mientras se maneje el bosque y utilizarse en el tiempo y en la forma más deseable;
 - e. la energía y el balance del costo de los árboles es favorable, es decir, que el balance energético y los costos requeridos en producir madera y energía utilizable resultan, al final, favorables.

Hoy se habla frecuentemente de **silvicultura energética** o de plantaciones energéticas (Sirén⁶⁸). Tal término se utiliza generalmente en el manejo de bosques artificiales o plantaciones de rápido crecimiento para producción de leña, principalmente. La importancia del suministro de energía a regiones rurales es generalmente reconocida y no discutida. La mayor y más importante fuente de energía, en la mayoría de los casos, es la madera utilizada en su forma más simple, como leña, carbón o gas. Si la leña escasea en las zonas rurales, lo cual representa el caso de muchas regiones centroamericanas, el resultado puede ser un aumento del gasto de energía humana en colectarla (en El Salvador y otros países centroamericanos, se comprobó que las áreas potencialmente críticas de consumo de leña se localizaban en zonas en donde la mujer o los niños de la familia rural debían caminar hasta 15 kilómetros diarios para conseguirla). Las especies de rápido crecimiento, aptas para leña, pueden establecerse en las mismas parcelas del agricultor, sin quitar campo a sus actividades normales de pastoreo o agricultura. Contribuyen decisivamente a aumentar el suministro de energía, independientemente de las posibilidades limitadas de producción de madera de los servicios forestales. Sin embargo, consumos excesivos de leña, en regiones en donde ésta escasea, pueden llevar al deterioro del suelo, escasez del agua y otras calamidades domésticas. Tal caso es muy común en varias re-

giones secas del nordeste del Brasil y de Centroamérica. Las especies aptas para leña, además de su poder calorífico, fácil ignición, completa combustión y emisión de humo inofensivo para el ambiente y la salud humana, deben contar con características silviculturales que las hagan particularmente apropiadas para este efecto; entre ellas, se mencionan:

- relativa tolerancia a la variabilidad de los sitios de plantación;
- capacidad de ocupación del sitio de plantación, incluyendo suelos degradados, en competencia o suprimiendo otra vegetación;
- respuesta a tratamientos culturales técnicamente factibles, como la fertilización;
- facilidad de plantación por vía vegetativa (por ejemplo, pseudo-estacas);
- logro de un crecimiento rápido en un tiempo relativamente corto (10 años o menos);
- efecto de protección del suelo.

Las especies más apropiadas para leña y otros usos han sido reseñadas en una excelente monografía, publicada por la National Academy of Sciences⁴², a la cual deseo remitir al lector interesado. Entre las especies descritas en esta publicación para los trópicos húmedos y las tierras altas tropicales de América, merecen mención las siguientes:

<i>Acacia auriculiformis</i>	<i>Acacia mearnsii</i>
<i>Calliandra calothyrsus</i>	<i>Alnus acuminata</i>
<i>Casuarina equisetifolia</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>
<i>Gliricidia sepium</i>	<i>E. grandis</i>
<i>Gmelina arborea</i>	<i>E. deglupta</i>
<i>Guazuma ulmifolia</i>	<i>Acrocarpus fraxinifolius</i>
<i>Leucaena leucocephala</i>	<i>Grevillea robusta</i>
<i>Muntingia calabura</i>	<i>Inga vera</i>
<i>Sesbania grandiflora</i> *	<i>Matayba sp</i> *
<i>Trema spp</i>	<i>Byrsonima crassifolia</i> *
<i>Brosimum alicastrum</i> *	<i>Mimosa tenuiflora</i> *
<i>Hematoxylon brasiletum</i> *	<i>Tectona grandis</i> *
<i>Diphysa robinoides</i> *	<i>Lysiloma keilermanii</i> *

* Especies reportadas por el Proyecto CATIE-ROCAP: Leña y fuentes alternas de energía (Ver Jones, J.R.³⁶; Ugalde, L.⁷⁵; Jones y Otárola³⁷).

El suelo en los sistemas de producción agroforestal

Es difícil y aún prematuro proponer en una forma detallada las prioridades, objetivos y estrategias de una investigación edafológica en los sistemas de producción agroforestales, pues se necesita conocer en detalle un inventario de los recursos y una definición de los objetivos necesarios, con el fin de formular tal estrategia, dependiendo de los planes y de los recursos que en cada caso se tengan preparados. Además, la identificación de objetivos primarios de investigación debe basarse en el conocimiento de las materias relevantes. Sin embargo, se podrían definir algunas metas necesarias y casi obvias de investigación del suelo en sistemas agroforestales (de las Salas y Fasbender⁶⁰):

- descripción de las bases científicas del suelo;
- selección y prueba de métodos experimentales de trabajo en ensayos de corto, medio y largo plazo;
- examen de las condiciones del suelo y del microclima (agua y nutrimentos) y de las interrelaciones entre los componentes;
- desarrollo de metodologías para determinar los requerimientos nutricionales de los sistemas de producción cuando se introducen medidas agroforestales;
- establecimiento y evaluación de los métodos tradicionales del manejo del suelo en pequeña escala, dentro de los sistemas agroforestales de finca, para desarrollar nuevas tecnologías, a la luz de las condiciones socio-económicas y de infraestructura de la región de investigación.

El método de investigación adoptado por el Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza (CATIE) parece apropiado para los sistemas agroforestales. Consiste en desarrollar tres niveles simultáneos de investigación: nivel de laboratorio; investigación en condiciones controladas, en parcelas experimentales, e investigación en las condiciones reales del campesino en sus fincas. Esta estrategia tiene la ventaja de identificar los factores que limitan la aplicación de los resultados de la investigación a las condiciones socio-económicas del agricultor. Lundgren⁴⁰ comenta que es necesario un enfoque multidisciplinario, si se quiere una aproximación al concepto reciente y "explosivo" de **agroforestal**, el que ha conducido a una creencia muy extendida de que se trata de una nueva ciencia, capaz de integrar componentes forestales, agronómicos, de suelos, ecológicos, socio-

lógicos, económicos y otros. El mismo autor opina que es cierto que el diseño y el estudio de los sistemas agroforestales requerirá la competencia de todos estos campos y que se tendrán que obtener respuestas relevantes. Pero que no es verdad, sin embargo, que exista una ciencia de la agroforestación bien definida, con sus propias metodologías. Aun en el caso de que algunos problemas sean típicos de la temática agroforestal, como se ha discutido en este capítulo, no son únicos ni se hallan completamente separados de problemas estudiados en otras disciplinas. Es importante tener en cuenta que, al sintetizar el estado actual de los conocimientos, existe normalmente un considerable conocimiento dentro de las diferentes ciencias, conocimiento relevante para el estudio de los sistemas agroforestales. Una duplicación de esfuerzos o una formulación de hipótesis incorrectas y estrategias igualmente incorrectas, o aún la aceptación sin mayor escrutinio de errores, puede fácilmente desembocar en una evaluación poco seria y por lo tanto inútil. Aun en el estrecho sector de las relaciones edafológicas, existe una información muy útil que debe aprovecharse dentro de los espectros institucionales, lingüísticos, geográficos y socio-económicos.

Afortunadamente se están desarrollando, por parte de los institutos de investigación de América Tropical, estrategias de investigación en el campo y a nivel experimental, que van identificando las limitaciones y los potenciales de estos sistemas. Merece mencionarse, en este contexto, el Programa de Agroforestación del CATIE, auspiciado por la Universidad de las Naciones Unidas; y el Programa de Investigación Agroforestal, con comunidades nativas del trópico húmedo, realizado por la Corporación Nacional de Investigaciones Forestales (CONIF) en la región pacífica de Colombia. Recientemente, el Consejo Internacional para la Investigación Agroforestal (ICRAF) auspició un inventario mundial de información sobre investigaciones en este campo. Se espera, de él, que despeje ciertas dudas y aporte mayor conocimiento, para que los institutos y personas dedicadas a la especialidad puedan formular estrategias cada vez más concretas y reales y obtener éxito en este **nuevo uso de la tierra**, en el que no pocos investigadores han manifestado sus dudas.

RESUMEN

1. La ganadería y la agricultura en el trópico húmedo han sido las actividades que más conflicto y opiniones controvertidas han

generado. La expansión de la "frontera agrícola", política de los países tropicales, ha estimulado el proceso de deforestación de la selva húmeda.

2. En regiones húmedas, el pastoreo puede derivar en una rápida disminución de la productividad de los pastos, debido a los efectos de compactación por el pisoteo en suelos arcillosos saturados; además, el control de malezas se hace casi imposible y causa gradualmente una invasión de helechos, que pueden ser más tolerantes que el pasto a suelos ácidos infértiles. Sin embargo, investigaciones recientes acercan la posibilidad de garantizar el mantenimiento de la fertilidad y protección de suelos bien drenados, manejando adecuadamente los potreros y eventualmente introduciendo plantaciones. Tales alternativas se están ensayando en la Amazonía peruana (Yurimaguas) y en la Estación Experimental de Pucallpa, en el mismo país.

3. Existen en la Cuenca Amazónica 345 millones de hectáreas (71%) de suelos bien drenados, con pendientes menores del 30%. Esta gran superficie representa un inmenso potencial para la explotación agrícola, pecuaria y forestal. Sin embargo, la alta intensidad de lluvia, así como el mal manejo de las praderas y el impacto de la deforestación para adaptar los suelos amazónicos y —en general— los de otras selvas húmedas, a actividades ganaderas, crean condiciones muy favorables para la erosión. A ello se suma el hecho de que un gran porcentaje (90%) de esos suelos es deficiente en fósforo, aunque sólo el 16% tiene una alta capacidad de fijación de este elemento. La gramínea del género *Brachiaria* provee una buena protección contra la erosión, por lo que presenta una alternativa de manejo del suelo en regiones húmedas tropicales. El uso de mejores pastos, menor carga animal y asociaciones con leguminosas u otros cultivos, deben permitir un aprovechamiento de las praderas y del suelo más acorde con sus potenciales. Algunas especies forrajeras y pastos que han demostrado ser promisorios para suelos ácidos de la Orinoquía colombiana son los siguientes: *Stylosanthes guianensis*, *Pueraria phaseoloides*, *Centrosema pubescens*, *Melinis minutiflora*, *Hypparrhenia rufa* y *Brachiaria decumbens*.

4. Algunos investigadores son de la opinión de que la ganadería y la agricultura de subsistencia, si bien responden a los niveles tecnológicos de quienes las practican, constituyen garantía para que permanezcan en un continuado estado de pobreza, convirtiendo el medio tropical en improductivo e inestable.

5. El mantenimiento de la fertilidad del suelo, bajo distintos usos de la tierra (bosque, plantaciones forestales, barbechos, cultivos, pastos y otros), implica que los agroecosistemas deben estar caracterizados por: 1) alta sustentabilidad agrícola; 2) sustentabilidad social, en el sentido de aprovechar en la mejor forma los rendimientos para el mayor número de usuarios; 3) autosuficiencia máxima, en términos de productos localmente generados; 4) efectos mínimos sobre otros recursos; y 5) efectos macroecológicos minimizados.
6. La finalidad de los cultivos múltiples consiste en lograr una máxima producción por unidad de tiempo y área, con un mínimo deterioro de los recursos (luz solar, suelo, agua), haciendo más eficiente su utilización.
7. Las técnicas agroforestales han sido definidas (Combe y Budowski¹⁶) como el conjunto de técnicas de manejo de tierras que implican la combinación de árboles forestales con cultivos, ganadería o una combinación de ambos. Tal asociación puede ser simultánea o escalonada, en el tiempo y en el espacio. Tiene como objetivo optimizar la producción por unidad de superficie, respetando siempre el principio del rendimiento sostenido. También se ha vinculado la agroforestación con la idea de utilizar los árboles como un componente del manejo global de los recursos del suelo, destinado a satisfacer las necesidades de alimento, energía, cobijo e ingresos de la gente. El sistema debe ser social, cultural y económicamente aceptable, con el objeto de maximizar la producción total a un nivel dado de insumos y de minimizar el daño ambiental.
8. Algunas de las ventajas más importantes de los sistemas agroforestales son: a) aprovechamiento más eficiente del espacio; b) aporte y reciclaje de nutrientes; c) producción de madera, leña y forraje; d) mejoramiento de la estructura del suelo y de su capacidad de absorción de agua; e) uso más eficiente de los nutrientes y del agua, a diferentes profundidades, por plantas con diferentes sistemas radicales. Frente a las ventajas mencionadas, se presentan ciertas desventajas: a) competencia por luz, energía, nutrientes y agua; b) efectos alelopáticos entre cultivos; c) daños a los cultivos en las operaciones de entresaca y cosecha de árboles.

9. Existen dudas sobre si estos sistemas constituyen realmente una solución para aumentar la productividad de las tierras. La adopción de tales prácticas debe depender de los resultados que arroja la investigación sistemática, en cuanto a su producción biológica, la reducción efectiva de las tasas de erosión y la alternativa que brinden para mejorar la producción y productividad de la tierra como sistemas estables.
10. La especie forestal más difundida —que crece en asocio con una amplia variedad de cultivos (cacao, café) y pastos en América Tropical, sobre un millón de hectáreas— es el laurel (*Cordia alliodora*). Su rendimiento en estas condiciones es de 200 a 250 m³/ha en un período de 20 a 25 años.
11. Existe una gran variedad de árboles y arbustos utilizados como forraje en el mundo subtropical, en las regiones áridas y semi-áridas. En el trópico americano se ha extendido el uso de *Leucaena* (*Leucaena leucocephala*) y guandul (*Cajanus cajan*). El primero se considera un árbol "milagroso" por sus múltiples aplicaciones (forraje, leña, sombra, control de erosión, alto rendimiento) y relativa rusticidad. El guandul ha sido reportado como resistente al fuego, propiedad ventajosa para su establecimiento en sabanas quemadas repetidas veces. Además de estas dos especies, se han descrito por lo menos 50 que merecen su inclusión en los programas de desarrollo rural. Algunas de ellas son las siguientes: *Acacia auriculiformis*, *Sesbania grandiflora*, *A. mangium*, *Acrocarpus fraxinifolius*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Calliandra calothyrsus* y varias de los géneros *Albizia* y *Schizolobium*.
12. El sistema integrado de producción estratificada (SIPE) (Fig. 37), permite manejar las etapas dinámicas del establecimiento de una alternativa agroforestal. El modelo referido aquí se aplica a la Amazonía. Podría orientarse hacia una economía de subsistencia o de mercado, dependiente de las especies elegidas. El sistema puede perfeccionarse seleccionando variedades y clones, agilizando métodos de inoculación con micorrizas de la hojarasca del bosque natural e impulsando ensayos con plantas de interés potencial.
13. La utilización de árboles para producción de energía (leña) y otros objetivos sociales, ha introducido en el uso de la tierra un nuevo concepto: la llamada "silvicultura social". Se habla tam-

bién de "silvicultura energética". Las especies aptas para leña deben tener varias de las siguientes propiedades: a) alto poder calorífico; b) fácil ignición; c) completa combustión; d) tolerancia a suelos degradados; e) respuesta a tratamientos culturales técnicamente factibles, como la fertilización; f) facilidad de plantación por vía vegetativa.

14. La investigación del suelo en sistemas agroforestales debe obedecer a los siguientes criterios:

- descripción de las bases científicas del suelo;
- selección y prueba de métodos experimentales;
- examen de las condiciones del suelo y del microclima;
- desarrollo de metodologías para determinar los requerimientos nutricionales de los sistemas de producción;
- evaluación de los métodos tradicionales de manejo de suelos dentro de los sistemas de finca.

BIBLIOGRAFIA

1. ALVIM, P. DE T. 1978. Perspectivas de produção agrícola na região Amazônica. *Interciencia* 3(4):243-249.
2. APOLO, W.A. 1980. Evaluación de la escorrentía superficial y la erosión en un pastizal con árboles aislados en La Suiza, Turrialba, Costa Rica. Tesis M.Sc. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica, 69 p.
3. ————. 1981. Los árboles en los sistemas forrajeros del trópico húmedo: una alternativa en el manejo de cuencas. p. 161-170. In Chavarría, M. (ed.). Simposio internacional sobre las Ciencias Forestales y su contribución al desarrollo de la América tropical. San José, Costa Rica. Ed. EUNED. 283 p.
4. AVILA, M.; RUIZ, M.; PEZO, D.; RUIZ, A. 1979. La importancia del componente forestal en pequeñas fincas ganaderas de Costa Rica. p. 175-183. In Salas, G. De Las (ed.). Taller Sistemas Agroforestales en América Latina. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Marzo, 226 p.
5. AYERBE, G.R. 1974. Pinar San Carlos, Popayán, municipio de Cajibío, Colombia: establecimiento de explotación mixta reforestación-ganadería. 8 p. (manuscrito sin publicar).
6. BEER, J.W.; SALAS, G. DE LAS; KLARKIN, K.L.; GLOVER, N. 1981. A case study of traditional agroforestry practices in a wet tropical zone; the "La Suiza" Project. In Chavarría, M. (ed.). Simposio internacional sobre las Ciencias Forestales y su contribución al desarrollo de la América tropical. San José, Costa Rica. Edit. EUNED. 283 p.

7. BENE, J.C.; BEALL, H.W.; COTE, A. 1977. Trees, food and people; land management in the tropics. Ottawa. IDRC 52 p. (también en español: el bosque tropical sobre-explotado y subutilizado. Bogotá, CONIF. Serie técnica No. 5. 1978).
8. BISHOP, J.P. 1982. Agroforestry systems for the humid tropics east of the Andes. p. 403-417. In Hetsch, S.S. (ed.). Amazonian, Agriculture and land use research. Proceedings of an international conference. Cali, Centro Internacional de Agricultura Tropical. 428 p.
9. BRISCOE, C.B. 1980. Jari: un complejo agroforestal industrial p. 288-293. In Withmore, J.L. (ed.). Producción de madera en los neotrópicos vía plantaciones. Simposio IUFRO/MAB/USFS/. Instituto de Dasonomía Tropical. Río Piedras, Puerto Rico.
10. BUDOWSKI, G. 1979. National, bilateral and multilateral agroforestry projects in Central and South America. Conference on International Cooperation in Agroforestry. Nairobi, Kenya. July, 24 p.
11. _____. 1980. The place of agroforestry in managing tropical forest. In Mergen, F. (ed.). International Symposium on Tropical Forests: Utilization and Conservation. New Haven. Yale University. USA.
12. _____. 1977. Agroforestry in the humid tropics; a program of work. IDRC Report. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 24 p.
13. _____. 1981. Agroforestry in Central America. In Heuvelod, J. and Lagemann, J. (eds.). Agroforestry: proceedings of a Seminar held at CATIE, Turrialba, Costa Rica. CATIE/GTZ/DSE, p. 13-21.
14. CENTRO AGRONOMICO TROPICAL DE INVESTIGACION Y ENSEÑANZA. 1979. Taller sobre Sistemas Agroforestales en América Latina. In Salas, G. De Las (ed.). Turrialba, Costa Rica. Marzo 26-30. Actas. 226 p. (también en inglés).

15. COMBE, J.; GEWALD, N. 1979. Guía de campo de los ensayos forestales del CATIE. Turrialba, Costa Rica. 378 p.
16. _____; BUDOWSKI, G. 1980. Clasificación de las técnicas agroforestales. In Salas, G. De Las (ed.). Taller Sistemas Agroforestales en América Latina. CATIE. Turrialba, Costa Rica. Marzo, 1979.
17. _____. 1979. *Alnus acuminata* con pastoreo y con pasto de corte; Las Nubes de Coronado, Costa Rica. p. 205-208. In Taller Sistemas Agroforestales en América Latina. Turrialba. Actas. Editado por Salas, G. De Las, Turrialba, Costa Rica. CATIE.
18. _____. 1981. Advantages and limitations of pasture management with agroforestry systems. p. 41-47. In Heuvelodp, J. y Lagemann, J. (eds.). Agroforestry; proceedings of a seminar held in Turrialba, Costa Rica. CATIE, 102 p.
19. _____. 1982. Agroforestry techniques in tropical countries: potential and limitations. *Agroforestry Systems* 1(1):13-29.
20. _____; JIMENEZ, SAA, H.; MONGE, C. 1981. (Comps). Bibliografía sobre agroforestería tropical. Turrialba, Costa Rica. Centro agronómico de Investigación y Enseñanza (CATIE). Serie Bibliotecología y Documentación, Bibliografía No. 6. 67 p.
21. CUBILLOS, G.; SALAZAR, M. 1980. La investigación en el manejo de pastos en zonas de ladera de trópico húmedo. p. 325-340. In Novoa, A.; Posner, J. (eds.): Agricultura de ladera en América Tropical. Memoria Seminario Internacional. Turrialba, Costa Rica. 357 p.
22. DECCARET, D.M. 1967. La influencia de los árboles leguminosos y no leguminosos sobre el forraje que crece sobre ellos. Tesis Mg. Sc. Turrialba, Costa Rica. IICA. 34 p.
23. DEUDNEY, D.; FLAVIN, C. 1983. Renewable energy: the power to choose. Worldwatch Institute. New York, London. Norton & Co. 431 p.

24. DONGELMANS, L. 1980. Análisis de costos y beneficios de la reforestación para leña y cultivos en terrazas. Doc. de trabajo no. 6. Proyecto COHDEFOR/PNUD/FAO/HON/77/006.
25. DUBOIS, J.L.C. 1979. Los sistemas de producción más apropiados para el uso racional de las tierras de la Amazonía. p. 79-130. In Seminario sobre los Recursos Naturales Renovables y el Desarrollo Regional Amazónico. Bogotá, Colombia, IICA.
26. EARL, D.E. 1975. Forest energy and economic development. Oxford. Clarendon Press.
27. ECKHOLM, E. 1979. Planting for the future: forestry for human needs. Worldwatch paper 26. Worldwatch Institute. Washington, 64 p.
28. _____. 1975. The other energy crisis: firewood. Worldwatch paper no. 1. Worldwatch Institute. Washington. 22 p.
29. _____. 1979. Planting for the future: forestry for human needs. Worldwatch paper no. 26. Worldwatch Institute. Washington. 64 p.
30. ESCOBAR, M.L.; DEL VALLE, J.I. 1983. Producción de madera del nogal (*Cordia alliodora*) asociado con café en Antioquía, Colombia. Curso Técnicas Agroforestales. Turrialba, Costa Rica. 14 p. y anexos (mimeo).
31. ESPINOZA, L. 1982. Estructura general de cafetales de pequeños agricultores en Acosta-Puriscal, Costa Rica. 19 p. (mimeo).
32. FEARNSIDE, P.M. 1981. Alternativas de desenvolvimento na Amazonía brasileira; una avalia, ção ecologica. In CEPAL/PNUMA. Seminario sobre cooperación horizontal na América Latina em Materia de Estilos de Desenvolvimento e Meio Ambiente. Brasilia, Brasil. 58 p.
33. FOURNIER, L.A. 1979. El cultivo del jaúl (*Alnus jorullensis*) en fincas de café en Costa Rica. p. 163-168. In Taller siste-

mas agroforestales en América Latina. Actas. Editado por Salas, G. De Las, Turrialba. CATIE, Costa Rica.

34. GONZALEZ, P.C.A. 1981. Nodulación y fijación de nitrógeno por *Alnus jorullensis* HBK en condiciones de invernadero y de campo. Universidad Nacional. Medellín, Colombia. Proyecto de Tesis. 24 p. (manuscrito).
35. HETSCH, S.B. 1982. Agroforestry in the Amazon Basin: practice, theory and limits of a promising land use. In Hetsch, S.B. (ed.). Amazonian; agriculture and land use research. Proceedings of an international conference. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia, p. 332-371.
36. JONES, J.R. 1982. Diagnóstico socioeconómico sobre el consumo y producción de leña en fincas pequeñas de la península de Azuero, Panamá. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. Informe técnico no. 32. 85 p. (mimeo).
37. _____ ; OTAROLA. 1981. Diagnóstico socioeconómico sobre el consumo y producción de leña en fincas pequeñas de Nicaragua. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica. Informe técnico no. 16. 69 p. (mimeo).
38. KING, F.S. 1968. Agro-silviculture; the Taungya system. Ibadan Department of Forestry. 109 p.
39. LAGEMANN, J.; HEUVELDOP, J. 1983. Characterization and evaluation of agroforestry systems: the case of Acosta-Puiscal. (Costa Rica) Agroforestry Systems 1(2):101-116.
40. LUNDGREN, B. 1979. Research strategy for soils in agroforestry. p. 523-538. In Mongi, H.O.; Huxley, P.A. (eds.). Soils research in agroforestry: proceedings and expert consultation. International Council for Research in Agroforestry. Nairobi, Kenya.
41. MOLLEPAZA, A.J.E. s.f. Producción de biomasa de poró (*Erythrina poeppigiana* O.F. Cook) y de laurel (*Cordia alliodora* Ruiz & Pav.). Oken asociados con café. 74 p. (manuscrito no publicado).

42. NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. 1977. *Leucaena: promising forage and tree crop for the tropics*. Washington, 115 p.
43. _____. 1979. *Tropical legumes: resources for the future*. Washington. 331 p.
44. _____. 1980. *Firewood crops: shrub and tree species for energy production*. Washington, D.C. 237 p.
45. NATIONAL ACADEMY PRESS. 1983. *Mangium and other fast-growing acacias for the humid tropics*. Washington. 62 p.
46. _____. 1983. *Calliandra: a versatile small tree for the humid tropics*. Washington. 52 p.
47. NAVAS, A.J. 1982. Considerations on the colombian amazon region. p. 39-59. In Hetsch, S.B. (ed.). *Amazonian; agriculture and land use research. Proceedings of an international conference*. Cali, Centro Internacional de Agricultura Tropical. 428 p.
48. PARSONS, J.J. 1976. Forest to pasture: development or destruction? *Rev. Biol. Trop.* 24(1):121-133.
49. PAYNE, W.J. 1976. Possibilities for the integration of tree crops and livestock production in the wet tropics. *Sci. Food, Agric.*, 27 p.
50. PECK, R.B. 1977. *Sistemas agrosilvopastoriles como una alternativa para reforestación en los trópicos americanos*. In *El bosque natural y artificial*. Bogotá, Colombia. CONIF. Serie técnica no. 3: 73-84.
51. _____; 1982. Forest research activities and the importance of multi-strata production systems in the Amazon Basin (humid neo-tropics). p. 373-385. In Hetsch S.B. (ed.). *Amazonian; agriculture and land use research. Proceedings of an international conference*. Cali, Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical. 428 p.
52. PIMENTEL, D. *et al.* 1981. Energy from forests: environmental and wildlife implications. *Interciencia* 6(5):103-110.

53. RODRIGUEZ, B.C. 1966. Fixation of nitrogen in root nodules of *Alnus jorullensis* H.B.K. *Phyton* 23(2):103-110.
54. ROSERO, P.; GEWALD, N. 1979. Crecimiento de laurel (*Cordia alliodora*) en cafetales, cacaotales y potreros en la zona atlántica de Costa Rica. p. 211-215. In Salas, G. De Las, (ed.). Taller Sistemas agroforestales en América Latina. Turrialba, Costa Rica. Actas. CATIE. 226 p.
55. RUIZ, M. 1982. Informe sobre el sector ganadero. Estudio de caso de manejo ambiental: desarrollo integrado de la zona tropical húmeda de la Selva Central del Perú. OEA/PNUMA/ONERN. Lima. 53 p. (manuscrito).
56. RUSSO, R.O. 1982. Resultados preliminares de biomasa de la poda de *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook (poró) en Turrialba, Costa Rica. CATIE. 7 p. (mimeo).
57. _____. 1981. *Erythrina*: un género versátil en sistemas agroforestales; revisión bibliográfica. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 10 p. (mimeo).
58. _____. 1983. Efecto de la poda de *Erythrina poeppigiana* (Walpers) O.F. Cook (poró), sobre la nodulación, producción de biomasa y contenido de nitrógeno en el suelo en un sistema agroforestal "café-poró". Tesis de Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, UCR-CATIE, 108 p.
59. SALAS, G. DE LAS, 1981. State of some agroforestry case studies in Colombia. Reports to IFIAS. Bogotá, Colombia. 52 p. y anexos.
60. _____; FASSBENDER, H.W. 1981. The soil science basis of agroforestry production systems. In Heuveland, J. and Lagemann, J. (eds.). *Agroforestry: Proceedings of a seminar held at CATIE*. Turrialba, Costa Rica. CATIE/GTZ/DSE. p. 27-33.
61. _____. 1980. El laurel (*Cordia alliodora*), una especie forestal prometedor para el trópico americano: evidencias en Costa Rica y Colombia. In Withmore, J.L. (ed.). *Producción de madera en los neotrópicos vía plantaciones*. Simposio IUFRO/MAB/USF. Instituto de Dasonomía Tropical. Río Piedra, Puerto Rico. p. 274-286.

62. _____ . 1983. Plan de investigación agrosilvopastoril. Proyecto Cuenca Alto Magdalena. INDERENA/BANCO MUNDIAL. 166 p. y anexos.
63. _____ ; GEWALD, N.; ROSERO P. 1979. Conservación de suelos ondulados con barreras vivas para la producción de cultivos de subsistencia. Proyecto CENTA/CATIE/CEE. El Salvador, Subproyecto No. 3.
64. _____ . 1979. Recuperación de suelos bajo agricultura de subsistencia en la zona de Tejutla, Chalatenango, El Salvador. Proyecto CENTA/CATIE/CEE. El Salvador. Subproyecto No. 4.
65. SANCHEZ, P.A.; BANDY, D.E.; VILLACHICA, J.H.; NICHOLAIDES, J.J. 1982. Amazon basin soils: management for continuous crop production. *Science* 216(4548):821-827.
66. SCHUBART, H.O.R.; SALATI, E. 1982. Natural resources for land use in the Amazon Region: the natural systems. p. 211-241. In Hetsch, S.B. (ed.). *Amazonian; agriculture and land use research. Proceedings of an international conference.* Cali, Centro Internacional de Agricultura Tropical. 428 p.
67. SERRAO, E.A.S.; FALESÍ, I.C.; DA VEIGA, J.B.; NETO, J.F.T. 1978. Productividad de praderas cultivadas en suelos de baja fertilidad de la Amazonía de Brasil. In *Producción de pastos en suelos ácidos de los trópicos* (Tergas, L.E.; Sánchez, P.A. eds.). Cali, Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical Serie 0356-5, p. 211-243.
68. SIREN, G. 1982. Silvicultura energética. *UNASYLVA*. 34(138):22-28.
69. SMIT, G.S. 1971. Notas silviculturales sobre el *Alnus jorullensis* de Caldas, Colombia. *Turrialba* 21:83-88.
70. SORIA, J. *et al.* 1975. Investigación sobre sistemas de producción agrícola para el pequeño agricultor del trópico. *Turrialba* 25(3):283-293.

71. SPAIN, M.J. *et al.* 1974. Diferencias entre especies y variedades de cultivos y pastos tropicales en su tolerancia a la acidez del suelo, p. 313-335. In Bornemisza, E. y Alvarado, A. (eds.). Manejo de suelos en la América tropical. Trabajos de una Conferencia Internacional. Cali, Colombia. CIAT y North Carolina State University. 582 p.
72. TOLEDO, J.M.; MORALES, V.A. 1979. Establecimiento y manejo de praderas mejoradas en la Amazonía peruana, p. 191-209. In Tergas, L.E.; Sánchez, P.A. (eds.). Producción de pastos en suelos ácidos de los trópicos. Cali. Centro Internacional de Agricultura Tropical.
73. _____; SERRAO, E.A.S. 1982. Pasture and animal production in Amazonian, p. 281-309. In Hetsch, S.B. (ed.). Amazonian; agriculture and land use research. Proceedings of an international conference. Cali. Centro Internacional de Agricultura Tropical. 428 p.
74. TOSI, JUNIOR, J.A. 1975. Some relationships of climate to economic development in the tropics. In The use of ecological guidelines for development in the American humid tropics. IUCN Publications New Series No. 31. Switzerland, Morges. p. 41-58.
75. UGALDE, L.U. 1982. Especies sugeridas para la producción de leña en Centroamérica y resultados de algunas experiencias. Presentado al curso sobre metodologías y técnicas de producción de leña. Amatitlán, Guatemala. INAFOR/Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 12 p. (mimeo).
76. VEGA, C.L. 1979. Comparación de la rentabilidad de las plantaciones regulares con el modelo de agrosilvicultura en Suriname. In Salas, G. De Las, (ed.). Taller Sistemas Agroforestales en América Latina. Turrialba, Costa Rica. Actas, p. 111-127.
77. WADSWORTH, F.H. 1978. El uso de los terrenos marginales en la región del Caribe. p. 47-66. In Zadroga, F.; Morales, R. (eds.). Taller Regional sobre Manejo de Cuencas y Areas Silvestres. Turrialba, Costa Rica, CATIE.

78. _____ . 1983. Momento para una observación a fondo. Nota editorial. Boletín de la International Society of Tropical Foresters. 4(2) Bethesda, Maryland. E.U.A.
79. WATTERS, R.F. 1974. Shifting cultivation: its past, present and future. In UCN. The use of ecological guidelines for development in the humid tropics. Proceedings of an International Meeting. Caracas, Venezuela, IUCN publ. new series No. 31. 1975. p. 77-87.
80. ZOBEL, B. 1980. The forest as an energy source, s.n.t. 16 p. (mimeo).

EL SUELO BAJO PRODUCCION FORESTAL

BOSQUES NATURALES

El *status* nutricional del suelo bajo bosque natural *

La opinión de que la exuberancia del bosque tropical obedece a un alto nivel de nutrimentos del suelo mineral ha quedado hace mucho tiempo sin piso. Esta exuberancia se debe al ciclo cerrado de nutrimentos, desde el *litter* y los primeros centímetros del suelo mineral hacia la parte aérea del ecosistema forestal.

Existen hoy numerosos estudios que comprueban la pobreza general de los suelos que soportan bosque lluvioso tropical. El Cuadro 64 trae datos sobre las principales características químicas de algunos suelos de América Tropical bajo bosque natural. Puede apreciarse que la mayoría de los nutrimentos y la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) revelan una pobreza extrema del suelo mineral superficial. Los altos contenidos de N de Venezuela (Hetsch⁵⁸; Franco⁴⁵) y Costa Rica (Krebs⁷¹) obedecen a condiciones particulares de sitio. Algo similar sucede con el fósforo

* Se ha utilizado el concepto *bosque natural* para indicar también rastrojo secundario natural.

en los suelos venezolanos. Como se reseñó en el Cap. 12, la baja fertilidad de suelos de pastizales antiguamente cubiertos de bosque, es objeto de un tratamiento especial para suelos ácidos. En rastrojos secundarios, el nivel de algunos nutrimentos del suelo es más alto (p.e. Ca, K), debido generalmente a la quema del bosque primario.

CUADRO 64: *Status* nutricional del suelo en algunos bosques naturales de América Tropical

Autor	Lugar y Tipo de suelo	Profundidad (cm)	C% ^a	N% ^b	O/N	P asim	K	Ca	Mg	CIC
							me/100g			
Sombroek ¹²¹	Territorio Amapá Brasil (Oxisol)	0-10 Ah	0.97	0.10	9.7	1.3 mg/100g	0.03	0.64	0.36	2.66
Huston ⁶²	Costa Rica *	0-100	---	---	---	2.62 ppm	0.30	8.12	---	---
Salas, G. de las	Colombia Chocó (Ultisol)	0-30	1.62	0.15	12.4	0.90 n	0.20	1.38	0.42	14
Salas, G. de las ¹⁰¹	Colombia Carare (Ultisol)	0-10 Ah	1.34	0.12	11	11.8** ppm	0.0	3.10	0.44	4.05
Hetsch ⁵⁸	Venezuela (Inceptisol húmico-óxido)	0-15 Ah	7.8	0.64	12.2	47 mg/100g	0.34	0.33	0.68	9.89
Franco ⁴⁵	Venezuela <i>Aeric Tropaquept</i>	0-10 Ah	2.64	0.27	9.8	87.5** mg/100g	0.49	8.83	2.42	13.4
Cortés <i>et al</i> ²⁵	Colombia, Amazonía (Inceptisol)	0-17 Ah	0.5	0.08	6	17.5 ppm	0.10	---	---	5.5
Proyecto Radargram, ⁹²	Colombia, Amazonía (<i>Aquic Haplortox</i>)	0-16 Ah	1.24	---	---	1	0.10	0.4	0.4	8.5
Stark ¹²²	Amazonía *** (Arenas Podsol)	0-4	15/13.4	---	---	---	342/410	892/11	80/36	31.9/17.8
Stark ¹²³	Suriname (Oxisol)	0-3	9.8	0.26	113**	---	500	900	1400	3.2
Goodland y Pollard ⁴⁹	Brasil (Podsol)	0-3	---	0.16	---	0	100	40	136	9.4
Klinge <i>et al</i> ⁷⁰	Venezuela, Amazonía (Ultisol)	6-21 Ah	4.7	---	---	---	0.07	0.03	0.18	10
Flores <i>et al</i> ³⁹	Perú, Amazonía (Ultisol)	0-10	1.63	0.10	16.3	8 ppm	0.10	0.23	0.05	2.8
López y Cox ⁷⁷	Brasil "Cerrado" (Ultisol)	---	1.28	---	---	2	0.08	0.25	0.09	0.35-8.1
Alexander ²	Nicaragua (Oxisol)	7-14 A2	1.0	0.07	14	---	0.04	0	0.23	6.2
Krebs ⁷¹	Costa Rica	0-10	5.62	0.63	8.95	---	1.81	591 ppm	181	21.5
Sánchez y Buol ¹⁰⁷	Perú, Amazonía (Podsol)	0-19 Ah	1.21	---	---	---	0.20	2.2	0.2	2.9

* Promedio de 46 sitios y una profundidad media del suelo mineral de 0-100 cms.

** Fósforo total.

*** Cifra del numerador corresponde a suelos peruanos, denominador a suelos del Brasil. K, Ca, Mg expresados en ppm (también para el ejemplo de Stark¹²³).

Las características edáficas y la composición de especies de árboles

La relación entre los nutrimentos del suelo y la composición de especies en bosques tropicales está bien documentada. Sin embargo, la mayoría de los estudios no encontró correlaciones claras entre los nutrimentos del suelo y el patrón de distribución de especies de árboles, aun en bosques no disturbados (Poore⁹¹; Hardy⁵⁵; Ahn¹; de las

Salas y Agudelo¹⁰³). Si se tiene en cuenta el gran número de factores que influyen sobre el crecimiento y distribución de las especies vegetales, no es extraño que éstos sean difíciles de detectar. No obstante, es cierto que el factor edáfico condiciona la presencia de cierto tipo de plantas.

La fisionomía general de la estructura y otros parámetros de las comunidades vegetales, tales como su dominancia, abundancia y frecuencia, están a veces correlacionados con condiciones edáficas y muestran patrones de distribución asociados con el drenaje, la profundidad, la textura y otros factores edáficos (Goodland y Pollard⁴⁹; Webb¹³⁹; Hetsch y Hoheisel⁵⁹; Richards^{95, 96}; Lemme⁷⁶; Sarlin^{108, 109}). Huston⁶² encontró en Costa Rica una relación específica entre los nutrimentos del suelo y la diversidad de las especies. Comprobó que la baja disponibilidad de nutrimentos no es una consecuencia única de la alta diversidad forestal; y que la disponibilidad de los mismos en el suelo no muestra ninguna relación con la biomasa del bosque. Comenta que ni el área basal ni la cosecha en pie tuvieron relación significativa con los nutrimentos ni con el número de especies. La Fig. 38 expone la relación entre el número de especies de árboles y la disponibilidad de nutrimentos del suelo, en 46 áreas forestales de Costa Rica.

Huston⁶² comenta que el hecho de que una correlación exista, es probablemente de menos importancia que la naturaleza específica del patrón (Fig. 38). Si el patrón puede ser imaginado como una línea diagonal, desde un ambiente de muchas especies con niveles bajos de nutrimentos hacia un número bajo de especies a niveles altos de nutrimentos, con todos los habitats sobre o por debajo de la línea y casi ninguno por encima de ella, se podría interpretar como indicativo de un límite superior de especies bajo ciertas condiciones nutricionales. No es sorprendente que suelos de baja fertilidad alberguen a la vez bosques pobres y ricos en especies, ya que son muchos los factores que intervienen en la reducción del número de especies, incluyendo la deficiencia extrema de un nutrimento en particular u otra condición edáfica extrema, y el tipo y frecuencia de perturbaciones. El interrogante es que los bosques con un número alto de especies se encuentran únicamente sobre suelos con niveles bajos de nutrimentos, y que los suelos fértiles sostienen únicamente bosques de pocas especies. Para América Tropical, este último caso se evidencia en las masas homogéneas de Cativo (*Prioria copaifera*), sobre suelos aluviales fértiles de Colombia, Costa Rica y Panamá. Estos suelos se dedican al cultivo de banano con gran éxito. una vez explotado el bosque. Ashton⁴ hizo observaciones en el mismo sentido, trabajan-

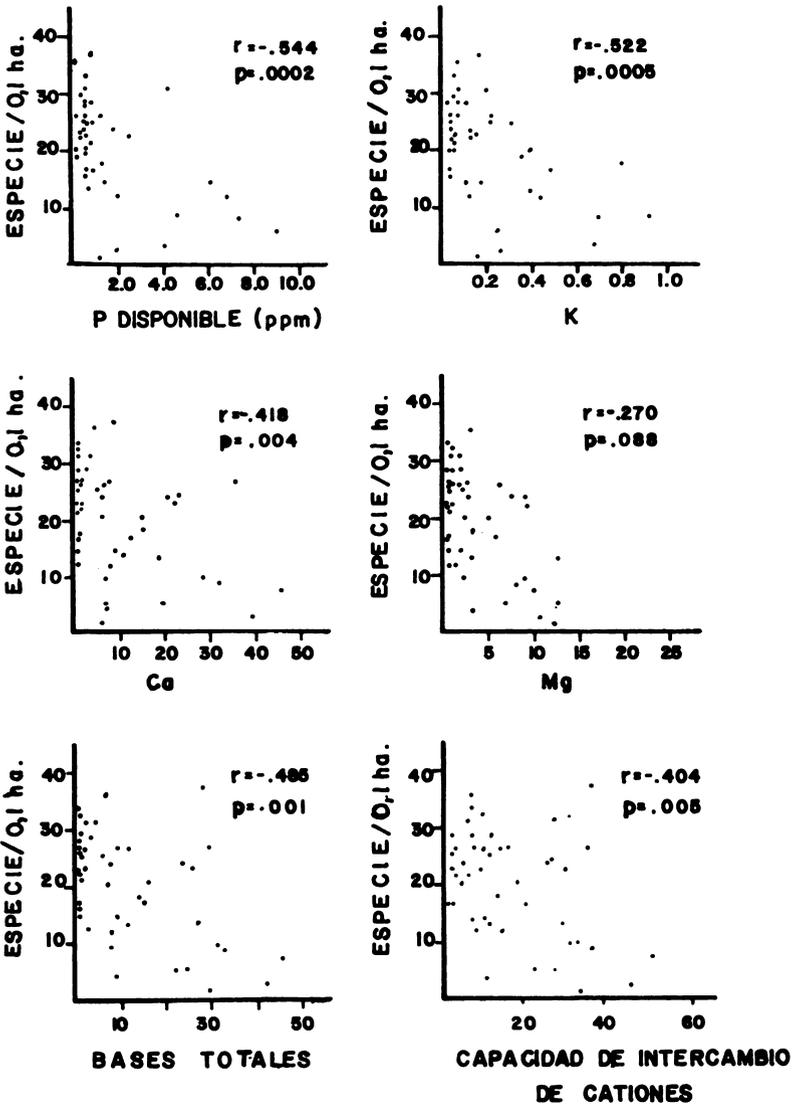


FIG. 37. Relación entre el número de árboles y la disponibilidad de nutrientes del suelo en 46 áreas forestales en Costa Rica. Todos los valores reflejan el promedio de los 100 cm superiores del suelo y se expresan en miligramos por cada 100 mg del suelo, siempre que no se especifica lo contrario.

FUENTE: Huston⁶². Reproducido con permiso de Chavarría Manuel, editor: Simposio Internacional sobre las Ciencias Forestales y su Contribución al Desarrollo de la América Tropical. 1981. San José, Costa Rica. Edit. EUNED.

do florísticamente en los bosques de Malasia. Brünig¹³ comprobó, en el bosque "enano" de Sarawak y Brunei (Borneo), que las asociaciones de palmas ocurrían en medios edáficos mal drenados. Por su parte Schulz^{110, 111, 112} atribuye a la aireación del suelo y su capacidad de retención de agua, la variación en el patrón de vegetación y en la distribución de especies en el bosque mesofítico de Suriname. La fertilidad del suelo ha sido reportada —como en el caso de Costa Rica, citado por Huston⁶²— por otros autores (Ashton y Brünig⁵; Sarlin^{108, 109}; Singh¹¹⁹; Richards^{95, 96}.) como el factor edáfico responsable de la diversidad florística y estructural del bosque natural tropical. Von Christen¹⁸ detectó para el bosque húmedo tropical del Carare-Opón, Colombia, las siguiente especies asociadas con suelos fuertemente estancados de terrazas pliocenas: *Humiriastrum colombianum*, *Couma macrocarpa*, *Goupia glabra* y *Miconia minutiflora*. Para sitios mejor drenados: *Cariniana pyriformis*, *Virola flexuosa*, *Anacardium excelsum*, *Casearia oblongifolia*, *Apeiba aspera*, *Vochysia ferruginea* y *Calophyllum maria*. Estas dos últimas especies se encontraron también en suelos fuertemente estancados (*Vochysia ferruginea*) y en pantanos oligotróficos (*Calophyllum maria*).

Franco⁴⁵, en sus trabajos en los Llanos Occidentales de Venezuela con suelos mal drenados (hidromórficos), trató de relacionar el fenómeno de la caída de las hojas de los árboles con períodos de sequía estacional del suelo. Encontró que ciertas especies (*Acacia articulata*, *Cerela odorata*, *Lonchocarpus pictus*, *Spondias mombin*, *Bombacopsis quinatum*), entre otras, botaban sus hojas siempre durante el período seco, mientras que algunas (*Brosimum sp*, *Chrysophyllum caracasana*, *Ficus sp*, *Triplaris sp*) las conservaban en este período. Otras especies como *Coroupita guianensis*, *Guazuma tomentosa*, *Pithecellobium sp*, *Cordia apurensis* tenían la propiedad de perderlas en ambos períodos. Para definir una clasificación de sitios más amplia y por lo tanto independiente de las características de defoliación de las especies, agrupó los suelos de acuerdo con las propiedades siguientes: a) textura y horizontes; b) estancamiento en el espacio radical intensivo (0-100 cm); c) nivel freático. Finalmente, vale la pena mencionar que uno de los mecanismos, capaz de explicar la consistencia del sistema de Zonas de Vida de Holdridge⁶¹, puede encontrarse en la aparente relación entre los nutrimentos y el número de especies de árboles, como se comprobó para 46 sitios boscosos de Costa Rica (Huston⁶²). Tal vez existan otros ejemplos en los trópicos que escapen al conocimiento del autor.

La explotación del bosque natural y su impacto sobre el suelo

En América Tropical se explotan grandes extensiones de bosque natural (generalmente, bosque húmedo tropical) empleando maquinaria pesada. Su efecto sobre el suelo se manifiesta en la compactación de los primeros centímetros, como se comprobó en recientes investigaciones realizadas en la Selva peruana (Seubert, Sánchez y Valverde¹¹⁵). En Colombia, y debido a un tipo especial de bosque casi único en el mundo (bosque de Sajal y Guandal*), la explotación (apeo, extracción y transporte) causa daños a la regeneración natural, debido a que se altera el medio edáfico, al dejar abiertos los canales de transporte de trozas. La operación mejora el drenaje de los pantanos. Estos sitios son difícilmente utilizables para la agricultura, la cual está unida a grandes riesgos durante la época de "agua alta" de los ríos.

Von Christen²¹ comenta que la regulación del nivel de agua de fondo logró buenos resultados en Malasia con diferentes cultivos. En Colombia —similarmente a lo que se practica en Asia— se están habilitando pantanos para cultivos de arroz de inundación. Los manglares de Vietnam se habilitaron hace tiempo para este cultivo y últimamente los de Guinea Bissau. Probablemente otros sitios de manglar explotado sufren el mismo proceso.

Los bosques pantanosos tropicales constituyen sitios forestales especiales, que requieren un manejo especial (Alonso³; Neyra⁸⁵). Estos suelos (*Humic Tropaquents*) no tienen posibilidades agrícolas, después de explotado el bosque, ya que están afectados periódicamente por inundaciones provenientes de las mareas y el represamiento de los ríos.

Vale la pena anotar el hecho de que la explotación por cable del bosque mixto pluvial (7000 mm/año) del Bajo Calima (colinas bajas costeras del Pacífico), en Colombia, sobre suelos de franco arcillosos a arcillosos moderadamente drenados (*Humic Dystropepts*), no causó daños físicos en las capas superficiales; y el hecho mismo del apeo aporta gran cantidad de materia orgánica que recicla al ecosistema. Este método de aprovechamiento es único en el mundo (T.C. Withmore, comunicación personal).

* Asociación boscosa compuesta principalmente por dos especies: Sajo (*Camnosperma panamensis*) y Cuángare (*Irianthera Joruensis*).

La regeneración natural del bosque primario

La regeneración natural del bosque explotado se ha emprendido con éxito y fracaso, en cuanto a la recuperación del bosque virgen en los trópicos asiáticos y africanos, desde principios del siglo. En América Tropical, el bosque nativo se empezó a manejar por el sistema de la regeneración bajo dosel protector, desarrollado por los africanos. En Suriname, sólo a partir de 1956 se iniciaron ensayos de manejo (recuperación) del bosque, utilizando varios sistemas: manejo de la regeneración natural, plantaciones de enriquecimiento, plantaciones compactas de especies nativas (*Virola surinamensis*, principalmente) y exóticas (*Cedrela angustifolia*, *Eucalyptus deglupta* y *Cordia alliodora*, entre otras). Plantaciones grandes de enriquecimiento se comenzaron en 1968, principalmente con pino (*Pinus caribaea*).

En Colombia, la investigación sobre regeneración natural del bosque aprovechado y sobre otros sistemas silviculturales se inició sólo en 1968, en el bosque húmedo del Carare-Opón, en el Valle Medio del río Magdalena. Una descripción de los sistemas de manejo silvicultural del bosque nativo está fuera de los objetivos de este capítulo. Sólo se menciona la regeneración natural como un método de manejo, para recuperar el *status* nutricional del suelo, después de que el aprovechamiento (generalmente a tala rasa) del bosque ocasiona una gran pérdida de nutrimentos, debido a la biomasa extraída. El estudiante forestal puede encontrar una buena reseña de los sistemas silviculturales en el trópico húmedo, en del Valle¹³¹.

Los sistemas silviculturales que emplean la regeneración natural tienen como objetivo principal mantener la productividad del bosque, favoreciendo el establecimiento y crecimiento de la regeneración preexistente (del Valle¹³¹). Este sistema se ha aplicado con éxito en los bosques de *Dipterocarpaceas* del Sudeste de Asia. En Puerto Rico, el bosque natural de las montañas de Luquillo se ha enriquecido por la regeneración natural de Tabonuco (*Dafryodes excelsa*) (Wadsworth¹³⁶). En Venezuela, Finol^{37, 38} hace hincapié en la práctica de la silvicultura naturalista, basada en la regeneración natural y el manejo de especies valiosas para madera y como fuente de alimentos (p.e.: Palma Manaca: *Euterpe oleracea*, en el Delta del río Orinoco).

En Colombia, la regeneración natural de ecosistemas de bosques hídricos (catival y guandal), generalmente con suelos fértiles, no se ha manejado hasta ahora como método de recuperación del bosque explotado. Los madereros afirman que el bosque se cuida solo. En

efecto, ahora están aprovechando nuevamente áreas que dejaron abandonadas hace 20 años. Vale la pena mencionar aquí que el bosque mixto (más de 100 especies/ha) de Colinas Bajas del Bajo Calima, en la zona costera pacífica de Colombia, ha sido manejado con éxito por casi 20 años, con base en una regeneración natural muy agresiva, la cual prospera sobre suelos fuertemente lavados e infértiles, bajo lluvias de más de siete metros por año* (Mazuera y Ladrach⁸¹; de las Salas^{104, 105}).

En el bosque húmedo tropical del Carare-Opón, von Christen¹⁸ descartó la regeneración natural como método de recuperación del bosque explotado, debido a: 1) condiciones desfavorables de los suelos (mal drenados en su mayoría y excesivamente pobres en nutrientes) y 2) escasez de especies valiosas de rápido crecimiento en la regeneración. La regeneración natural del bosque mesofítico de Suriname fue evaluada como satisfactoria (Schulz^{110, 111}). Once años después se comprobó (von Christen y de las Salas²²) que los costos de los tratamientos para favorecer las especies valiosas resultaron sumamente altos. A pesar de ello, este método parece ser una alternativa válida para la recuperación del bosque, después de su aprovechamiento frente a otros métodos, como el del enriquecimiento por medio de plantaciones.

Werner¹⁴¹, investigando la sucesión secundaria en el bosque muy húmedo montano de *La Selva*, en Costa Rica, concluye preliminarmente que: a) Un buen número de especies forestales secundarias son también árboles gigantes en el bosque natural; b) Las especies secundarias regeneran fácilmente por rebrote, pero no lo hacen bajo su propia sombra; c) Los incrementos diamétricos máximos pueden alcanzar 1 cm/año en el bosque natural y 3 cm/año en el bosque secundario; d) El crecimiento es casi nulo en el sotobosque, tanto del bosque natural como secundario, con las notables excepciones de *Pentaclethra macroloba* y *Virola sp.* Dubois²⁸ señala que en el Planalto de Curuá, Belén, Amazonía brasileña, se obtuvo una regeneración casi pura de *Goupia glabra*, aplicando sombra lateral en un área sometida a explotación intensiva, seguida de corte raso y quema de los árboles residuales. Otras especies igualmente valiosas, *Bagassa guianensis* y *Vochysia maxima*, se establecieron en las fases pioneras de sucesión. Otros métodos también utilizados para estimular la regeneración natural de especies forestales prometedoras, en esta región

* Debido al tipo de industria (fabricación de pulpa de papel), se aprovecha un alto porcentaje (mayor de 90%) de las especies.

del Brasil y en la tierra baja de Venezuela (Campbell y Araujo¹⁴; Ministerio de Agricultura y Cría⁸³; Dubois²⁸), han probado ser exitosos.

Un mejor conocimiento de las especies de regeneración natural, especialmente de su capacidad reproductiva, su fuerza competitiva y sus tasas de crecimiento, es la clave para el manejo de los bosques secundarios, los cuales se están extendiendo aceleradamente en los trópicos húmedos. Ewel³² opina que probablemente la regeneración secundaria natural domine rápidamente muchas áreas deforestadas del trópico americano; por lo que una juiciosa aplicación de la tecnología adecuada, para la utilización de todas las especies (caso del Bajo Calima ya mencionado), sería altamente provechosa.

PLANTACIONES FORESTALES

Consideraciones generales

La **silvicultura de plantaciones forestales**, en Colombia, se encuentra hoy en un punto crítico de su desarrollo. La experiencia de los últimos 50 años en países de la zona templada, ha demostrado que el manejo forestal, basado únicamente en los tratamientos silviculturales, necesita conocer también los efectos del suelo sobre el rendimiento de las plantaciones. Hoy se conocen los requerimientos nutricionales y las exigencias de sitio de las especies forestales utilizadas ampliamente en programas de reforestación. En los trópicos, llegar a este conocimiento es naturalmente mucho más difícil, porque existe una considerable variación en los suelos, el clima y las mismas especies.

Muchas relaciones suelo-planta permanecen desconocidas. Sin embargo, con la intensificación reciente de la actividad reforestadora en los países tropicales americanos, y en Colombia en particular, se han abierto nuevos caminos para la investigación del suelo y su relación con el desarrollo de las especies forestales. Un camino seguro, aunque difícil, consiste en investigar las propiedades particulares de cada sitio y su relación con las exigencias de cada especie forestal, para seleccionarla adecuadamente y practicar las medidas más apropiadas de manejo, con el objeto de lograr la máxima rentabilidad.

Una alternativa inmediata de acción, en el establecimiento y manejo de plantaciones forestales, es la intervención directa a través de

la fertilización, con base en las deficiencias naturales del suelo y las exigencias de las especies.

Puesto que, en la zona andina, más del 70% de las plantaciones forestales se encuentran ubicadas en la zona montañosa, su manejo se hace aún más difícil, debido a la gran heterogeneidad de los suelos, su susceptibilidad a la erosión y los problemas propios de los Andosoles (p.e., alta fijación de fósforo, presencia de arcillas agrietables, alto contenido de aluminio).

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi estimó en 1973 que el 93% de las tierras colombianas no eran adecuadas para usos agrícolas, porque ello causarían erosión. Los terrenos de ladera con pendientes superiores al 25%, constituidos por tierras agrícolas improductivas y pastizales degradados, constituyen un reto para la producción de madera derivada de plantaciones forestales, ya que el único uso rentable posible es el forestal. El manejo del suelo en estos terrenos constituye un componente importante del manejo forestal.

El suelo como factor de producción

La optimización de los rendimientos de cualquier cosecha requiere el suministro a las raíces de los elementos necesarios. Tal suministro corre a cargo del suelo, el cual pone a disposición de la planta básicamente agua, nutrimentos y oxígeno. Al considerar el suelo como un factor de producción, se deben formular dos preguntas:

- 1) ¿Cómo se reconoce y evalúa la productividad del suelo?
- 2) ¿Cómo se puede intervenir el suelo acertadamente para mejorar su productividad?

La respuesta a estos interrogantes exige sin lugar a dudas una clara concepción de la morfología del suelo, de sus procesos y de su variación geográfica (y sus causas).

Los principales factores, generalmente aceptados, que reflejan la productividad del suelo, son su retención de humedad, contenido de nutrimentos y aireación, mientras que la forma mundialmente practicada para mejorar esa productividad es la fertilización.

Si se tiene en cuenta que en América Tropical se reforestan anualmente un promedio de 300 000 hectáreas, se deduce fácilmente

te la importancia del suelo como factor de producción en el establecimiento y manejo de plantaciones forestales.

Cambios en el suelo bajo monocultivos forestales de rápido crecimiento

Parece razonable pensar que todo cambio en el uso de la tierra origina un cambio en el suelo. Para entender la razón de este cambio, es necesario entender también las interrelaciones más importantes existentes entre el suelo y la vegetación. La Fig. 39 representa estas interrelaciones. Cualquier tipo de vegetación o cosecha obtiene del suelo su suplemento necesario de agua, nutrientes y oxígeno, así como soporte físico. A la vez, la vegetación influye sobre el suelo, según el aporte de hojarasca caída y posteriormente descompuesta. Esta descomposición conduce a la formación de humus, cuya cantidad depende de la altura sobre el nivel del mar y de la temperatura (ver Fig. 20, Cap. 8).

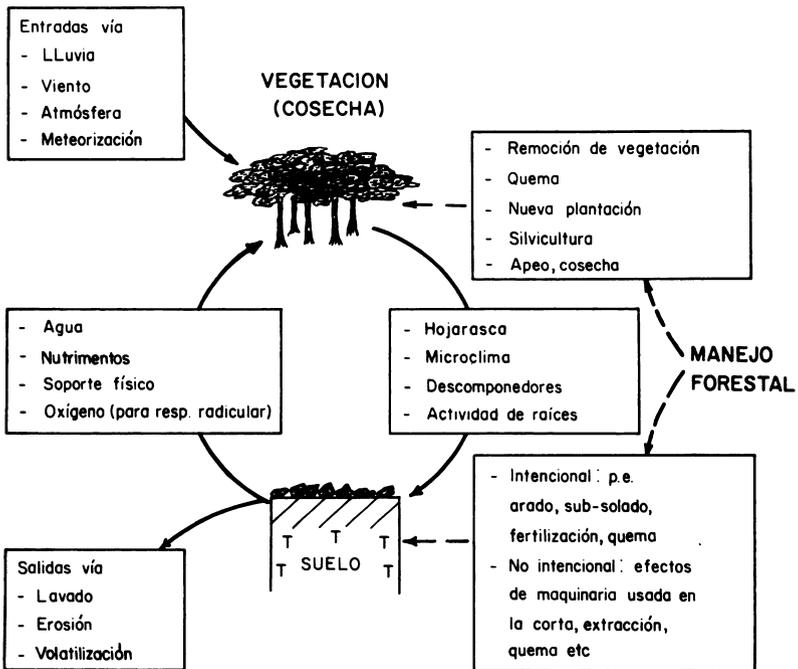


FIG. 38. Interrelaciones entre el suelo y la vegetación en un ecosistema vegetal. Según Lundgren⁸⁰.

Aunque existe la creencia de que la productividad del suelo puede declinar como resultado de monocultivos con especies forestales de rápido crecimiento, parece más razonable deducir que, no obstante las demandas particulares por nutrimentos de las especies, la degradación del suelo (si ocurre) variará con la intensidad de las lluvias, la temperatura, el material parental, la pendiente y con el propio manejo del suelo (Chaffey¹⁶; De las Salas¹⁰⁰).

La mayoría de las investigaciones en este sentido se ha dirigido a identificar los efectos del manejo forestal sobre la morfología del suelo, sus reservas de nutrimentos, su productividad a largo plazo, su microbiología, su ciclo de nutrimentos y otras propiedades físicas y químicas relevantes. Los estudios realizados en el trópico sobre la evolución del suelo bajo monocultivos forestales son escasos y sus resultados, en algunos casos, contradictorios. Chijioke¹⁷ estudió el impacto sobre el suelo de dos especies forestales: *Gmelina arborea* y *Pinus caribaea* en regiones tropicales: Brasil (Sabanas de Jari), Suriname (Blakawatra), Belice y Africa (Sierra Leona, Gambia, Nigeria). Lundgren⁸⁰ investigó detalladamente los cambios en la distribución de la materia orgánica y los bioelementos en la biomasa, la hojarasca y el suelo mineral (0-10 cm), durante una rotación de 30 años de plantaciones de *Cupressus lusitanica* y *Pinus patula* en Tanzania. Hase y Foelster⁵⁷ registraron los cambios edáficos ocasionados por plantaciones de teca (*Tectona grandis*) de cuatro a nueve años, en suelos aluviales del trópico bajo de Venezuela. Evans (citado por Chaffey¹⁶) analizó la productividad a largo plazo de plantaciones de *Pinus patula* en Africa. Las relaciones entre el crecimiento del pino caribe (*Pinus caribaea*) y el suelo en sabanas secas, al nororiente de Venezuela, fueron estudiadas por Vincent¹³⁵ en un trabajo sobre índices de sitio para esta especie forestal de rápido crecimiento. Fassbender *et al*³⁵ investigaron los requerimientos hidrológicos de esta especie en el mismo lugar. Johnson⁶⁵ describe y analiza las oportunidades y riesgos asociados con el establecimiento de especies forestales tropicales de rápido crecimiento.

Tschinkel¹²⁸ involucró factores edáficos y topográficos para tratar de explicar las variaciones en el crecimiento del *Cupressus lusitanica* en los Andes Colombianos. Investigaciones en el mismo sentido fueron conducidas por Jerez y Hurtado⁶⁴ y de las Salas y Franco¹⁰¹ en Colombia, con *Eucalyptus globulus* y *Cordia alliodora*, respectivamente.

Existen, por otra parte, excelentes monografías sobre especies forestales valiosas, de rápido crecimiento en los trópicos y subtrópi-

cos, pero sólo algunas describen las condiciones edáficas y los cambios del suelo bajo plantaciones. Lamb⁷⁴, por ejemplo, comenta que en el habitat natural del *P. caribaea*, el *status* nutricional del suelo es bajo; y que tanto en las Bahamas (suelo superficial con pH 8,4) como en Cuba (suelos neutros) y en América Central (pH 4,5) existe una deficiencia de nitrógeno compensada por la existencia de hongos micorrizales.

De todos los estudios realizados en los trópicos y subtrópicos, se ha concluído que se necesitan más datos sobre las tasas de crecimiento de las especies forestales plantadas, para derivar conclusiones firmes acerca de las consecuencias sobre el sitio, que permitan evaluar el problema de su productividad a largo plazo (Tschinkel¹²⁸; Chijioke¹⁷; Lundgren⁸⁰; Hase y Foelster⁵⁷; Chaffey¹⁶).

Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas del suelo, y el agua del mismo, han sido consideradas desde hace tiempo de importancia primordial para la productividad de los sitios cubiertos por plantaciones forestales. Los edafólogos forestales han reconocido el hecho y la influencia de las propiedades físicas del suelo sobre el crecimiento y la distribución de los árboles. Las propiedades físicas del suelo son menos fácilmente alteradas por causa del manejo de las plantaciones que las propiedades químicas. La estructura del suelo y la porosidad, sin embargo, pueden ser alteradas, al manejar el suelo bajo ciertas condiciones (labranza mínima, *mulching*, cero labranza y otros tratamientos).

Con respecto al impacto de las plantaciones de rápido crecimiento sobre las propiedades del suelo, varios autores (Chaffey¹⁶; Chijioke¹⁷; Pritchett⁹³; Lundgren⁸⁰), sugieren que dichos cambios se producen sólo en las capas superiores del suelo y se relacionan con el suministro de materia orgánica a partir de la hojarasca. Chaffey¹⁶ cita trabajos de Page, en los cuales demuestra que suelos bajo coníferas exhiben una mayor acumulación de humus, mayor porosidad y capacidad de infiltración y una menor densidad aparente que suelos bajo bosques de latifoliadas u otra vegetación.

Lamb⁷⁴ comenta que la falta de materia orgánica en suelos arenosos de la planicie costera de Tanzania, puede retardar el crecimiento del *Pinus caribaea*, var. *hondurensis*. El efecto de la hojarasca sobre las propiedades físicas del suelo depende, en primer lugar, del tipo de material vegetal y secundariamente del clima. Se sabe que la

hojarasca producida por plantaciones de coníferas tiene gran tendencia a acumularse, formando gruesas capas de humus bruto o mor, las cuales causan efectos adversos sobre el crecimiento de los árboles. En los trópicos, la hojarasca de coníferas se descompone probablemente más rápido que en regiones templadas. Sin embargo, la tasa de descomposición de la hojarasca y el humus, y su incorporación al ecosistema de plantaciones forestales, es relativamente baja si se compara con la misma en especies de latifoliadas. Stark^{122, 123} estimó en 0.55% la tasa de descomposición diaria de la materia orgánica en bosques húmedos de Suriname y Brasil. Nye⁸⁶ calculó esta misma tasa en 1.3%/día. Chijioke¹⁷ informa que en Queensland, Australia, el mantenimiento de la productividad mostró en términos parciales, ser dependiente de la eficiencia de descomposición de la hojarasca y de su posterior transformación en bioelementos esenciales para la planta.

En Kenya, Robinson *et al*⁹⁷ compararon los efectos sobre el suelo de plantaciones de *Cupressus lusitanica* de 16 años y de un bosque secundario nativo. No encontraron diferencias significativas en las propiedades físicas de los suelos. A igual conclusión llegó Tracey*, en Australia, al comparar la variación en las propiedades físicas del suelo con diferentes tipos de cobertura vegetal.

La mayoría de trabajos conducidos en este sentido concluyen que existe una interacción entre los factores físicos del suelo con otras características ecológicas que no deben ser descuidadas. Tales factores requieren una definición, antes de derivar inferencias sobre el significado de las características físicas del suelo respecto de la producción de las plantaciones.

Chaffey¹⁶ menciona que, aunque parece que los suelos bajo bosques son generalmente mejores en sus características físicas que los suelos no forestales, hay ejemplos en los cuales dicha condición física se ha deteriorado bajo ciertas especies (caso de la teca en India y Trinidad). El hecho de la falta de agua disponible para las plantas es aceptado por varios autores como un deterioro de las propiedades físicas del suelo y, por consiguiente, implica un descenso en el rendimiento de plantaciones puras.

Vincent¹³⁵ pudo correlacionar los mejores rendimientos de rodales de *Pinus caribaea*, en sabanas secas de Venezuela, con una buena capacidad de retención de humedad del suelo en los primeros 20

* Información suministrada por J.R. Palmer, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

cm, asociada con texturas franco-arenosas. La mayor parte de las alteraciones físicas del suelo se deben directamente a la compactación de su superficie, debido a labores de extracción con maquinaria pesada y otras operaciones forestales. Un aumento de la densidad aparente y una disminución de la materia orgánica en plantaciones de *Pinus radiata*, establecidas después de un bosque nativo de eucalipto en el sur de Australia, fueron reportadas por Hamilton⁵⁴.

Estudios realizados por Lundgren⁸⁰, en Tanzania, indicaron una tendencia hacia el mejoramiento inicial de la estructura del suelo (aumento de la materia orgánica y la porosidad, decrecimiento de la densidad aparente), durante los primeros cuatro a ocho años, seguido de un lapso de deterioro durante los subsiguientes 10 a 20 años, lo cual correspondía a un período de máxima densidad de plantación y crecimiento. Al final de la rotación (30 años), la estructura del suelo mejoró de nuevo.

Propiedades químicas del suelo

Al igual que con las propiedades físicas del suelo, los cambios más significativos en sus propiedades químicas, asociados con plantaciones, ocurren cerca o en la superficie y están relacionados con el suministro y descomposición de la materia orgánica. Las reservas de nutrientes del suelo están gobernadas en cierta medida por la naturaleza del material parental, por las propiedades químicas intrínsecas al suelo (principalmente capacidad de intercambio catiónico), por la selectividad de la cobertura vegetal y por el manejo mismo del suelo. Los cambios en los nutrientes disponibles para la plantación pueden sucederse directamente por remoción de la cosecha de madera; e indirectamente a través de la inmovilización de los nutrientes en las diferentes partes de la planta (tronco, ramas, ramillas, hojas, corteza, raíces). Se han reportado cantidades apreciables de nutrientes inmovilizados en plantaciones de especies tropicales forestales, especialmente de calcio, magnesio y en menor medida potasio (Lundgren⁸⁰; Chijioke¹⁷; Cornforth²⁴; Lamb^{73, 74}; Hase y Foelster⁵⁷; Chafey¹⁶).

En Suazilandia, Africa, Evans comparó análisis del suelo de plantaciones de *Pinus patula*, al año cero y al año nueve, y encontró pequeñas diferencias en la acidez, pérdidas en la mayoría de los nutrientes y una considerable acumulación de hojarasca. Encontró un aumento en el pH y una disminución en el nitrógeno, calcio y magne-

sio en forma relevante, pero no encontró cambios significativos en el nivel de fósforo y potasio. Sánchez¹⁰⁶ comenta que la máxima demanda por nutrimentos de la vegetación secundaria se encuentra entre los ocho y los 10 primeros años en las tierras tropicales y que, a la vez, la demanda por nutrimentos de plantaciones forestales es comparable a la de los cultivos en los trópicos húmedos americanos. Hase y Foelster⁵⁷ pudieron detectar reservas de potasio muy tensionadas, bajo plantaciones de teca de cuatro a nueve años de edad, en suelos aluviales de la tierra baja de Venezuela. Esta misma tensión en el nivel de potasio fue encontrada por Lundgren⁸⁰ en Tanzania, mientras que el calcio y el magnesio poseían niveles muy superiores a las demandas de la plantación, al término de la edad de rotación (30 años). Este hecho podría explicar por qué el nivel de nutrimentos del suelo y su fluctuación a través de la productividad de una plantación, es aparentemente irrelevante para la programación de plantaciones industriales en los trópicos.

Conforth²⁴ encontró, para el caso específico de plantaciones de *Pinus caribaea* en Trinidad, que el nivel de nitrógeno descendió durante cuatro años, después de quemado el bosque original, pero recuperó su estado inicial después de 10 años, mientras que el fósforo disminuyó por siete años y nunca recobró su valor original. Aumentos en el nivel de potasio, calcio y magnesio después de la quema fueron decreciendo, hasta perderse totalmente después de cuatro años. La reforestación disminuyó las reservas de nutrimentos en la mayoría de las áreas con fuertes pendientes y alta precipitación. El 74% de las reservas originales se perdieron en seis años. Es interesante anotar que el contenido de nitrógeno total en cualquier situación, bajo plantaciones de *Gmelina arborea* y *Pinus caribaea* en Brasil, estuvo presente en el suelo a niveles mayores que los óptimos, a pesar de las inmensas cantidades inmovilizadas por esas dos especies al tiempo de cosecha (Chijioke¹⁷). Este autor encontró que el 70 al 80% de los nutrimentos se inmovilizaban y se perdían, al cosechar el tronco más la corteza en las plantaciones mencionadas. Para *Gmelina arborea*, especie de rotación corta, comprobó que sus demandas en nutrimentos son dos veces mayores que las plantaciones viejas.

Al comparar estos datos con los obtenidos en Nigeria, estima que plantaciones de cinco a seis años requieren 132% más de potasio y un 50% más de calcio que plantaciones de 13 a 15 años de edad. Concluye también que la reserva total de nutrimentos intercambiables, en el suelo superior, muestra un aumento definitivo con respecto al bosque original, lo cual indica la eficiencia en la recirculación prove-

niente de plantaciones de *Gmelina arborea*, aunque los niveles de potasio continúan descendiendo. En los sitios investigados (Brasil, Suriname, Belice y Africa), el autor mencionado concluye que hasta el 25% de la pérdida de nutrimentos, debido a la cosecha total de las plantaciones, podría evitarse si se dejan la broza y los restos provenientes de la explotación sobre el mismo sitio, y de un 5 a 10% si la corteza proveniente de la explotación se dejara en el sitio.

Factores biológicos

Las propiedades y por consiguiente los cambios físicos y químicos, observados en el suelo a través de las plantaciones forestales, están influenciados directamente por factores biológicos. Los principales factores biológicos que tienen cierta significación en el mantenimiento de la productividad, bajo rotaciones sucesivas en plantaciones forestales, son la descomposición de la hojarasca, los organismos contenidos en la rizosfera y ciertos residuos de raíces o de hojas, puestos a disposición de las plantas, una vez descompuestos.

Existen factores de sitio que aparentemente tienen un significado grande, en relación con el humus y la descomposición de la materia orgánica y el calcio. La disponibilidad de calcio y la fauna del suelo, especialmente lombrices, son factores relacionados con el crecimiento de las plantaciones y, comparativamente, con factores de sitio, pero han recibido poca atención hasta ahora.

Vale la pena mencionar el papel de los termites, que pueden causar un efecto detrimental sobre el suelo, como lo reporta Chaffey¹⁶ en Kenya, en donde es conocido el descenso en el nivel de nutrimentos de los suelos forestales, por la remoción física de la hojarasca a partir del suelo orgánico. Un fenómeno similar de remoción del suelo superior por hormigas ha sido comprobado en algunos bosques secundarios en Turrialba, Costa Rica. Otro factor importante que tiene relación con la productividad de los sitios, bajo plantaciones forestales, es la micorriza, especialmente sobre suelos infértiles. Su efecto ha sido adecuadamente demostrado y bien documentado, al producirse fallas en la plantación, debido a la ausencia de hongos micorrizales. La micorrización en pino ha sido aprobada con éxito desde hace bastante tiempo en Nueva Zelandia y Australia; y también ha sido adoptada casi sin excepción en Colombia, Brasil y probablemente en otros países tropicales (ver Cap. 6).

Chaffey¹⁶ comenta acertadamente que las investigaciones sobre suelos forestales que se concentran únicamente en parámetros fácilmente medibles —empíricos, químicos y físicos— pero ignoran el componente viviente del suelo, no pueden proveer bases adecuadas para entender concretamente el proceso por el cual tiene lugar la descomposición de la hojarasca. Este proceso es esencialmente biológico y sugiere que las investigaciones sobre reciclaje de nutrientes en el bosque tomen en cuenta los organismos vivos que habitan en el suelo. El mismo autor propone que el énfasis del trabajo futuro sobre las causas del descenso de la productividad bajo monocultivos forestales, se concentre sobre los factores dinámicos que afectan el crecimiento de la planta, especialmente el clima y las propiedades biológicas del suelo.

Clima

Aunque el clima no se considera en este capítulo en forma especial, es evidente que juega un papel primordial sobre las plantaciones forestales e indirectamente sobre el impacto en las propiedades físicas y químicas del suelo. Las observaciones de Evans en Africa, por ejemplo (ver Chaffey¹⁶), comprobaron que las variaciones en la precipitación pueden ser un factor crítico en la productividad de *Pinus patula* en la región de Suazilandia. Esta evidencia sugiere que, si el crecimiento de la segunda rotación de rodales de esta especie era mejor o peor que la primera rotación, tal hecho debería ser atribuido por lo menos parcialmente a la precipitación del lugar. Parece razonable pensar que los factores climáticos pueden interactuar a menudo con otros factores; y que los cambios en las propiedades del suelo o en su microflora pueden estar relacionados con influencias climáticas, las cuales suelen ser pasadas por alto. Las observaciones de Evans sugieren una posible vinculación entre las fluctuaciones climáticas y el cambio en la micorriza, y el descenso en la productividad de plantaciones forestales de rápido crecimiento. Es importante tener en cuenta, en vista de los costos de replante en los programas de reforestación, el significado de la dinámica de agua en la rizosfera, el cual ha sido destacado por Waring¹³⁷. El autor comenta que la falta de agua es el único factor serio que limita el crecimiento del *Pinus radiata* en las plantaciones de Australia. Comenta también la importancia de la lluvia y su interrelación con la respuesta a la aplicación de fertilizantes, particularmente nitrógeno. La falta de agua ha sido declarada también como el principal factor limitativo del crecimiento de varios pinos, plantados sobre todo en áreas secas y semisecas de los trópi-

cos americanos (Vincent¹³⁵; Fassbender^{33, 34}). En barbechos secundarios de la tierra baja húmeda en Colombia, Foelster y de las Salas⁴⁰ encontraron que la falta de humedad del suelo, debido a un período seco de dos meses, influía negativamente en el crecimiento de la mayor parte de la vegetación. Finalmente, se sabe que el clima tiene una poderosa influencia sobre la descomposición de la hojarasca y, por consiguiente, sobre la recirculación de nutrimentos.

LA ECONOMIA DE NUTRIMENTOS EN EL BOSQUE

La circulación de nutrimentos en plantaciones

En el manejo de plantaciones, raras veces se toman en cuenta las pérdidas de nutrimentos por remoción de la biomasa total (tronco, corteza, ramas) en las operaciones de extracción y las ganancias derivadas de la caída del follaje, así como de su tratamiento adecuado para incorporarlo al suelo como abono. En muchos sitios forestales, particularmente en aquéllos con un humus tipo *mor*, gran parte de la descomposición de la materia orgánica ocurre en el suelo superficial. La mineralización de nutrimentos tan importantes como fósforo y nitrógeno, es particularmente activa en este horizonte superficial.

Caducifolia

La recirculación de nutrimentos a través de la caída del follaje es muy importante en sitios con suelos pobres, bajos en minerales meteorizables. En la zona tropical baja, esta recirculación es muy rápida y compensa la escasa fertilidad del suelo. No sucede lo mismo en las montañas, donde el proceso de descomposición de la hojarasca se ve frenado por la baja temperatura y la escasa actividad biológica.

Si se compara la producción de hojarasca de bosques naturales tropicales con la de plantaciones forestales comerciales, puede generalizarse que ésta última es cerca de dos a dos y media toneladas (aprox. 25%) más baja por hectárea y año en promedio. Esto no es sorprendente, si se tiene en cuenta que la mayoría de las plantaciones jóvenes poseen altos incrementos en biomasa.

CUADRO 65: Nutrimientos inmovilizados en el bosque y en la capa de humus

Componente del bosque	Materia orgánica peso seco T/ha	N	P kg/ha	K	Ca			
1 Rodal	305	319	40	324	187			
2 Follaje	3	39	2.7	2.6	18			
3 Humus								
3.1 humus bruto	28	276	26	53	96			3.4 35
3.2 Moder	430	9000	---	130	30			3.0 28
3.3 Mull	154	7000	---	200	240			6.3 10
4 Madera	10	6.6 (17)	0.9 (33)	0.8 (31)	5.4 (30)			
5 Biomasa total	686/496	2004/1263	186/147	1042/1090	1075/1818			
6 Follaje (retorno anual)		64/50	5/4	36/30	63/101			
7 Remoción promedio anual		40/28	4/3	23/24	25/41			
8 Remoción promedio anual (en % de 6)		63/56	80/75	66/80	40/40			

1/ *Pinus radiata*, 35 años. (Will, G.M. Comm. (1964). For Rev. (43).

2: Caída anual de hojarasca: el mismo rodal.

3.1 Humus bruto bajo *P. patula* (Christen, H. von, 1964. For S. Africa (5).

3.2 Moder bajo un bosque tropical montano (Tanner, E.J. 1977. Ecol. (66).

3.3 Mull bajo un bosque tropical montano (Edwards, P.J. Ecol. 1977. (66).

4. Madera removida por la cosecha de *P. radiata* (promedio anual: 20 m³/ha. Cifra entre paréntesis representa el % de la caída anual de hojarasca.

5, 6, 7 y 8: Datos de Lundgren (1978); la primera cifra (numerador) del quebrado corresponde a

P. patula, la segunda a *Cupressus lusitanica*, ambas especies de 30 años.

FUENTE: Adaptado de von Christen^{18,19,20,21} y Lundgren⁸⁰.

Inmovilización de nutrimentos

Una gran acumulación de humus, bajo los rodales tropicales de montaña, especialmente de coníferas, origina una enorme inmovilización de nutrimentos. El Cuadro 65 ilustra esta situación. Se aprecia claramente que en el moder y el mull de un bosque tropical montano se inmovilizan nueve y siete toneladas de nitrógeno por hectárea, mientras que un rodal maduro de *Pinus patula* en Sudáfrica inmoviliza solamente 276 kilogramos, correspondiente al 87% del mismo elemento en la biomasa del bosque.

Las pérdidas de los bioelementos por la cosecha de madera no parecen muy grandes, si se comparan con la mayoría de las cosechas agrícolas, pero en realidad son significativas para suelos de baja fertilidad.

Estas pérdidas corresponden a un porcentaje de los elementos reciclados anualmente, a través de la caída del follaje (17% N., 33% P, 31% K, 30% Ca). Los nutrimentos inmovilizados en los diferentes componentes (hojas, ramas, tronco, litter) de plantaciones jóvenes (6-10 años) del trópico se muestran en el Cuadro 66. Aquí se advierten las mayores concentraciones en las hojas y en el tronco. En el litter del rodal de Pino caribe del Brasil, el contenido de N (226 Kg/ha) y Ca (175 Kg/ha) es desacomodadamente alto, siendo en este caso una circunstancia favorable para la reincorporación al suelo de estos dos elementos. Por otra parte, el pino africano aventaja a primera vista a su congénere del Brasil en el contenido de K, Ca y Mg.

Es importante anotar que la mayor cantidad de nutrimentos se encuentran inmovilizados en el pino caribe de 10 años, lo que parece corroborar la opinión de que la demanda máxima se alcanza en plantaciones de ocho a 10 años. La teca inmoviliza altos contenidos de calcio.

Remoción y demanda de nutrimentos

Existen pocos datos sobre la remoción y demanda de nutrimentos de especies forestales tropicales. Ejemplos sobre remoción de nutrimentos por cosecha de madera se reportan también en el Cuadro 65. La renovación de nutrimentos para el caso de *P. radiata* en Nueva Zelanda, corresponde a porcentajes relativamente bajos de los elementos reincorporados al suelo por la hojarasca (numeral 4 del Cua-

dro 65), mientras que para *P. patula* y *C. lusitanica* en suelos Andosoles y ferralíticos húmicos de Tanzania, esta remoción es alta (56-63% N., 75-80% P, 66-80% K, 40% Ca).

CUADRO 66. Nutrimientos inmobilizados (kg/ha) en la biomasa y en el *litter* de plantaciones forestales tropicales.

Especie, edad, sitio y autor	Componente	Peso seco kg/ha	N	P	K kg/ha	Ca	Mg
<i>Pinus caribaea</i>	hojas	9836	92.5	3.9	70.8	32.8	16.7
6 años, Nigeria	ramas	8287	25.7	1.7	12.4	17.4	5.8
	tronco	35 958	82.7	3.6	36.0	39.6	14.4
Egunjobi y Bada ³¹	corteza	7893	20.5	0.8	6.3	7.9	3.2
	raíces	15 600	39.4	1.6	31.2	21.8	9.4
	ramas muertas	---	---	---	---	---	---
	<i>litter</i>	3700	18.1	0.4	8.9	7.0	3.6
	Total:	81 274	278.9	11.9	137.1	126.2	62.1
<i>Pinus caribaea</i>	hojas	20 233	126.0	6.1	151.8	70.8	36.4
10 años, Nigeria	ramas	16 752	51.9	1.7	30.2	31.8	8.4
	tronco	76 488	137.7	7.7	61.2	61.2	23.0
Egunjobi y Bada ³¹	corteza	20 951	58.7	2.1	14.6	23.0	6.3
	raíces	34 149	82.0	6.8	68.3	64.9	27.3
	ramas muertas	2704	7.0	0.3	1.9	4.3	0.1
	<i>litter</i>	19 710	88.7	2.0	47.3	39.4	13.8
	Total:	190 990	598.3	26.7	375.0	295.5	116.0
<i>Pinus caribaea</i>	hojas	7200	87	10	13	50	6
6 años, Brasil (Jari)	ramas	5100	11	2	2	3	2
	tronco	46 800	84	19	30	19	16
	corteza	6900	15	2	1	6	1
Chijioke ¹⁷	<i>litter</i>	64 700	226.5	13	13	174.7	84.1
	Total:	130 700	423.5	46	59	252.7	109.1
<i>Gmelina arborea</i>	hojas	1100	24	4	10	4	4
6 años, Brasil	ramas	4900	14	4	12	5	4
	tronco	43 200	48	9	52	9	15
Chijioke ¹⁷	corteza	6700	42	5	19	25	16
	<i>litter</i> ^{1/}	2700	24	27	3	19	9
	Total:	58 600	152	24.7	96	62	48
<i>Tectona grandis</i>	hojas	3440	68	9.3	52	49	11
6 años	ramas	4242	19	7.3	42	37	6
Venezuela	tronco	39 386	125	46	161	200	39
	<i>litter</i>	20 757	159	18	36	240	33
Hase ⁵⁶ ^{2/}	Total:	68 275	371	80.6	291	526	79

* Incluye vegetación viva fuera del *litter* del árbol.

^{1/} Nutrimientos recalculados con base en datos del mismo autor.

^{2/} Datos calculados son promedios de tres parcelas, a partir de información del mismo autor.

FUENTE: Adaptado de Egunjobi³¹; Hase⁵⁶; Chijioke¹⁷.

La demanda de nutrimentos por las especies forestales ha sido escasamente investigada en el trópico, a pesar de representar un parámetro importante en el establecimiento y posterior manejo de plantaciones. Los escasos datos confiables reportados se resumen en el Cuadro 67.

Las cifras de remoción y demanda de nutrimentos, las cuales expresan la exigencia de una especie sobre el sitio, indican si el suministro de nutrimentos del suelo es capaz de satisfacer los requerimientos de las plantaciones a corto y a largo plazo. Además, tales cifras constituyen información esencial para el desarrollo de programas de fertilización. Las cifras del Cuadro 68 expresan el capital total de nutrimentos, su demanda y retorno anual promedio y su remoción por aprovechamiento de madera para rodales de *Pinus patula* y *Cupressus lusitanica* en Tanzania, Africa, durante una rotación de 30 años. Se tomó este ejemplo, por considerarse representativo de grandes extensiones ecológicamente similares a los trópicos americanos. Las cifras más importantes del Cuadro son las que muestran las remociones totales y anuales del ecosistema (numerales 8 y 9) y la demanda de las dos especies sobre el sitio (numeral 1). De estas cifras se puede inferir que las demandas sobre el sitio son relativamente bajas (N, Ca) y altas (P, K, Mg), teniendo en cuenta el capital de nutrimentos del suelo*: 13,4 – 14,1 t N/ha; 7,4 – 11,3 t Ca/ha.; 0,02 – 0,03 t P/ha; 0,3 – 0,6 t K/ha; 1,2 – 1,6 Mg/ha. Otras conclusiones derivadas del estudio de Lundgren⁸⁰ son las siguientes:

1. de las 100 toneladas de materia orgánica adicionadas al suelo por las plantaciones durante 10 años, sólo 10 restan al final del período (el resto desapareció vía respiración de consumidores o se incorporó al suelo en el proceso de humificación);
2. la remoción total de P (130 kg/ha) durante una rotación de 30 años, representa sólo 1/3 de la reserva de P en el suelo superficial a esa rotación. Los bajos niveles de P asimilable (15-20 kg/ha), en relación con la demanda anual promedio de 13 kg (Cuadro 67), indican que este nutrimento puede ser un factor limitativo del crecimiento. En suelos Andosoles (*Typic Dystradepts*) colombianos, la baja disponibilidad del fósforo resultó ser un factor limitativo del crecimiento de *Cupressus lusitanica* (Tschinkel¹²⁸).
3. el descenso serio de potasio es compensado por su baja demanda anual (78 kg).

* Reserva total para una profundidad de 50 cm.

CUADRO 67: Demanda anual promedio de nutrientes de algunas especies tropicales.

Autor	Especie	Edad (años)	País/Sitio	N	P	K	Ca	Mg	S	B
Jurado 1/	<i>E. grandis</i>	(7) *	Brasil Sao Pablo	47	0	31.5	73.5	16.2	19.6	167
Lundgren 2/	<i>P. patula</i>	(30)	Latosol vermelho Tanzania	145	13	78	109	32	----- kg/ha -----	
Lundgren	<i>C. lusitanica</i>	(30)	Andosol y Vertisol	102	10	74	177	16		
Chijioke 3/	<i>P. caribaea</i>	(6)	Brasil jari, Entisol arenoso	33	5.5	8	13	4		
Chijioke	<i>G. arborea</i>	(6)	Brasil Ultisol (Typic Rhodudult)	21	4	15.5	7	6.5		
Hase y Foester 4/	<i>T. grandis</i>	(9)	Venezuela (Llanos)	38	24	72	74	16		
Hase y	<i>T. grandis</i>	(4)	Inceptisol Dystropept	19	15	46	44	11.5		

* Nutrientes en gm/árbol (boro en mg/árbol)
1/ Jurado B.F. *et al*⁶⁷. 2/ Lundgren B.⁸⁰. 3/ Chijioke, E.O.¹⁷. 4/ Hase, H. y Foelster⁵⁷.

CUADRO 68: Circulación anual y total de nutrientes, capital y remoción en rodales de *Pinus patula* y *Cupressus lusitanica* en Tanzania durante una rotación de 30 años (todas las cifras en kg/ha).

<i>Pinus patula</i>		N	P	K	Ca	Mg
1.	Demanda anual promedio	145	13	78	109	32
2.	Retorno anual al suelo	64	5	35	63	17
3.	Remoción por raleos/año	14	2	8	10	3
4.	Retenido en la biomasa/año	67	6	35	36	12
5.	Inventario total a la edad de rotación	2004	186	1042	1075	346
6.	Remoción en las trozas por corta total	773	81	453	468	178
7.	Restos en el suelo por corta total	1231	105	589	607	168
8.	Remoción total del sitio	1205	126	696	753	277
9.	Remoción promedio anual	40	4	23	25	9
<i>Cupressus lusitanica</i>		N	P	K	Ca	Mg
1.	Demanda anual promedio	102	10	74	177	16
2.	Retorno anual al suelo	50	4	30	101	9
3.	Remoción por raleos/año	10	1	8	15	1
4.	Retenido en la biomasa/año	42	5	36	61	6
5.	Inventario total a la edad de rotación	1263	147	1090	1818	183
6.	Remoción en las trozas por corta total	560	63	472	781	68
7.	Restos en el suelo por corta total	703	84	618	1037	115
8.	Remoción total del sitio	845	93	724	1219	104
9.	Remoción promedio anual	28	3	24	41	3

NOTAS:
 1. = 2 + 3 + 4
 2. = nutrientes 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
 8. = 30 x 3. + 6
 9. = 8./30.

FUENTE: Lundgren⁸⁰

FACTORES DE SITIO Y PRODUCTIVIDAD

Factores que influyen sobre el rendimiento de las plantaciones

Hay muchos factores que influyen directa o indirectamente sobre el rendimiento de las plantaciones forestales. Su evaluación es más difícil mientras mayor número de parámetros se tomen en cuenta. Por consiguiente, es más razonable evaluar sólo aquellos factores que pueden inferirse indirectamente o son fácilmente medibles. Por ejemplo, la habilidad del suelo para soportar árboles, en relación con el suministro de nutrimentos, agua y aire, resulta muy difícil de medir directamente, mas puede deducirse de las propiedades físicas del suelo. Por consiguiente, en esta situación, en la cual se tiene escaso o ningún conocimiento empírico de las relaciones de causalidad de los fenómenos, la única manera de evaluación se reduce a compilar, hasta donde sea prácticamente posible, datos que pueden influir en el crecimiento y/o rendimiento de las plantaciones, para someterlos a un diseño estadístico (de las Salas⁹ ; Graves⁵⁰).

El conocimiento actual sobre rendimientos de plantaciones forestales de rápido crecimiento es escaso. Existen, sin embargo, técnicas de predicción que arrojan luz sobre la futura productividad de plantaciones valiosas en el neotrópico.

Jones⁶⁶ divide la metodología para clasificar un sitio forestal en *directa* e *indirecta*. El *método directo* se utiliza cuando existe un rodal establecido con una densidad considerada normal; puede evaluarse midiendo directamente los parámetros de crecimiento del árbol. La altura, ajustada a una edad de referencia común, constituye el llamado índice de sitio. Este método no puede aplicarse para la estimación de la productividad potencial de un sitio no cubierto por árboles.

El *método indirecto* de evaluación de sitios implica el establecimiento de parcelas de muestreo, que cubran todo el rango de la productividad que se desea averiguar. En cada parcela se registran los datos que se supone están relacionados con el crecimiento y se deduce la relación existente entre ellos y el índice de sitio.

Dentro del método indirecto, existe el enfoque vegetal, basado en las características fisionómicas de la vegetación; y el enfoque ambiental, que involucra variables que influyen en el crecimiento del árbol. Este enfoque se vale de dos técnicas principales: factorial y holística. La primera relaciona factores con el índice de sitio y esta-

blece un método de análisis de variables múltiples. La segunda técnica divide el ambiente en un número de clases discretas, siendo cada una homogénea, o que representen una productividad similar. Dentro de zonas climáticas uniformes, situadas en regiones fisiográficas similares, se pueden estratificar diferentes productividades de sitio, basadas sobre variables edáficas. Ralston y Carmean (citados por Pritchett⁹³) comprobaron que la mayoría de los factores de suelo, correlacionados con la productividad del sitio, fueron aquéllos que reflejaban el *status* de humedad, nutrimentos y aireación.

Varios autores más se han ocupado de la productividad y el rendimiento de especies forestales del trópico, entre ellos Evans; Vincent¹³⁵; Tschinkel¹²⁸; Keogh⁶⁹; del Valle¹³¹.

Estos estudios han sido hechos regionalmente; persiguen obtener curvas y tablas de rendimiento que permitan proyectar el manejo de la especie estudiada.

Calidad de sitio e índice de sitio

El estudio de calidad de las tierras para diferentes usos es una necesidad inaplazable en países con una alta tasa de aumento de población. La búsqueda de tierras aptas para reforestación industrial, en los países tropicales, se ha hecho cada vez más imperiosa, habida cuenta de la alarmante deforestación del bosque nativo valioso y la consiguiente escasez de materia prima.

En América Latina, Brasil, Venezuela, Suriname y Chile poseen ya estudios de calidad de sitio para sus extensas plantaciones de eucalipto y pino, gracias a la intensa actividad reforestadora de estos países en las últimas dos décadas. Estudios de clasificación de sitios más recientes se han hecho en Colombia, para *Cupressus lusitanica* (Tschinkel¹²⁸), *Eucalyptus globulus* (Jerez y Hurtado⁶⁴) y *Cordia alliodora* (Giraldo y del Valle⁴⁸).

Un aspecto que ha incidido en la carencia de tales investigaciones, en Colombia, es la escasa superficie reforestada y la ausencia de plantaciones desarrolladas (se estima en algo más de 80 000 hectáreas el área reforestada del país, de la cual un 70% no es mayor de 10 años).

La identificación de la *calidad* de las tierras tiene que comparar alternativas de evaluación que relacionen las cualidades del suelo y

los requerimientos ecológicos para un uso específico, se trate de bosques, cultivos o animales.

Cada cualidad edáfica y/o climática debe tener su propia relación funcional directa con un uso específico, y ejercer una influencia específica sobre un requerimiento fundamental del uso asignado.

Una consideración de las cualidades de la tierra, en relación con sus requerimientos, ayuda en toda clasificación. Estas cualidades pueden ser de orden edáfico, fisiográfico y climático.

Un sitio es un lugar definido en la superficie de la tierra (p e., un bosque).

La **calidad de sitio** se identifica con la capacidad de producir bosque u otro tipo de vegetación, como producto de la interrelación de factores edáficos, bióticos y climáticos.

El **índice de sitio** se define como una razón, fórmula o dimensión cualquiera, con respecto a otra dimensión u otro valor. En las ciencias forestales expresa cuantitativamente la relación de altura con la edad de los árboles.

El índice de sitio es el resultado de una gran variedad de factores, los cuales condicionan la calidad del sitio. Entre estos factores, unos son controlados por el hombre (crecimiento, fertilidad, mejoramiento genético de plantaciones) y otros son incontrolables (clima).

El índice de sitio se expresa normalmente en forma de curvas y su empleo sirve para mostrar el desarrollo de la altura a una edad determinada. También puede emplearse con fines de clasificación.

La construcción de curvas de índice de sitio se basa en la determinación de la altura de los árboles dominantes, entre un número relativamente grande de parcelas de edad conocida, y en el cálculo de la regresión entre la edad y la altura. Bruce y Schumacher propusieron un método para convertir la relación curvilínea entre las dos variables anotadas, en una relación lineal, transformando la altura en su logaritmo y la edad en su recíproco. La ecuación propuesta por los autores citados se expresa en forma general como sigue:

$$H = b_0 \cdot b_1^{1/E}$$

$$\log H = \log b_0 + 1/E \log b_1$$

En la cual: H = altura total de los dominantes en metros.
 E = edad de los dominantes en años
 bo y bi = constantes.

Tschinkel¹²⁸ usó en Colombia esta ecuación para plantaciones de ciprés (*Cupressus lusitanica*), tomando como base la edad de 15 años.

Los factores edáficos en la clasificación de sitios forestales

Los factores del suelo en la clasificación de sitios constituyen una valiosa ayuda, por cuanto muchos de ellos son fácilmente de medir y además pueden cuantificarse.

La permeabilidad del suelo y la profundidad de la napa de agua, constituyeron las causas principales del crecimiento del *Eucalyptus saliana* sobre suelos hidromórficos en Sudáfrica. Se observaron diferencias de hasta cuatro metros de altura en plantaciones sobre suelos con buen movimiento del agua freática (información personal: H. von Christen). Los nutrientes del suelo han sido incluidos dentro de las causas principales del crecimiento de plantaciones forestales. Fassbender y Tschinkel³⁶ encontraron una correlación significativa entre el índice de sitio y los fosfatos aluminicos del suelo. Estos autores comprobaron, además, que los fosfatos citados, junto con el Mg y el K intercambiables, fueron responsables en un 52.2% del crecimiento del ciprés (*Cupressus lusitanica*) en Colombia; Jadán⁶³ pudo determinar, en las condiciones de Turrialba, Costa Rica, una marcada influencia del K y Mg intercambiables, en el índice de sitio del *Eucalyptus deglupta*.

Los factores mencionados y otros, como la textura y estructura del suelo, la profundidad efectiva, el pH, la materia orgánica, la pedregosidad, la resistencia del suelo a la erosión y aun el color, han sido evaluados solos o combinados como determinantes del índice de sitio. En Togo, Africa, Sarlin^{108, 109} comprobó por ejemplo una relación estrecha entre la profundidad efectiva del suelo, la suma de bases intercambiables y el rendimiento de la teca (*Tectona grandis*) y pudo cuantificar esta relación (ver Fig. 40).

Giraldo y del Valle⁴⁸ utilizaron para *Cordia alliodora*, en Colombia, la **función gama** como modelo y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el pH como variables. De acuerdo con este mode-

lo, el crecimiento máximo (Índice de sitio = 28 m) se alcanzó a pH de 5,5 y con una CIC de 40 m/100 g de suelo.

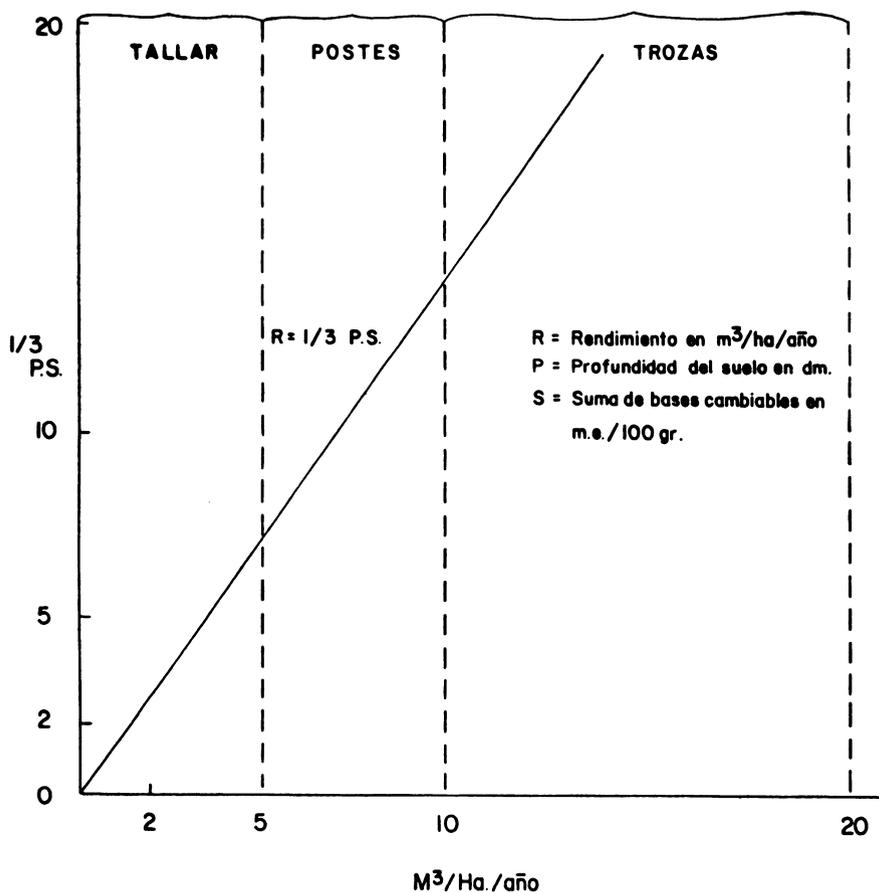


FIG. 39. Índice de rendimiento de teca (*Tectona grandis*) en Togo, África tropical (según Sarlin^{108,109}).

Searl¹¹⁴ en Trinidad y Storie¹²⁵ en California, basaron sus índices de productividad (el segundo autor lo denomina *índice de Storie*) en un 80% sobre factores edáficos; el 20% restante lo componen factores fisiográficos y climáticos. La clasificación de sitios forestales propuesta por Hills y Pierpoint⁶⁰, para Ontario, Canadá, se basa esencialmente sobre el régimen de humedad y fertilidad del suelo (el otro factor es el clima). Barnett *et al*⁷ establecieron la relación entre la susceptibilidad del suelo a la erosión y las propiedades de éste y del

sitio. Utilizaron un modelo de regresión múltiple que involucraba 34 variables, para pronosticar la tendencia del suelo a erosionarse. De ellas, las más importantes fueron la pendiente, la profundidad de la capa arable, la capacidad de campo, la composición granulométrica, la densidad del suelo y el porcentaje de carbono.

Los ejemplos anteriores bastan para resaltar la importancia de los factores edáficos en la clasificación de sitios.

Los factores climáticos

El clima constituye el principal factor modificador del suelo y del relieve. Esto hace que los factores antes considerados (edáficos y fisiográficos) no puedan evaluarse aisladamente.

En la clasificación de sitios, sobre todo si éstos deberán destinarse a reforestación, el interrogante más común es si las condiciones climáticas son apropiadas a las necesidades de las especies a plantar. Generalmente se recopila información sobre aspectos tales como: régimen de lluvias, vientos, humedad del aire, temperatura, luz y otros; y, en casos especiales, horas de sol y frecuencia de heladas y nieblas. Estos parámetros, junto con características edáficas y fisiográficas, se usan frecuentemente para establecer un mosaico de sitios que encajan dentro de un código fácil de evaluación: sitios buenos, regulares y malos (ver Fig. 41).

Limitaciones de los estudios de índices de sitio

Los estudios sobre índices de sitio y los modelos desarrollados (algunos citados aquí) para su evaluación, están sujetos a varias limitaciones, entre las cuales vale la pena destacar dos: a) tales estudios son locales y por consiguiente tienen a lo sumo una validez regional; y b) tienen que ser factibles de cuantificación (con base en regresiones o modelos matemáticos).

Por razón del número de factores que se deben cuantificar, los procedimientos de evaluación son a menudo complicados. Una interpretación correcta de los resultados exige no sólo grandes conocimientos en la materia, sino bases sólidas de estadística, combinación que raras veces se encuentra en una sola persona. La Fig. 42 representa dos procedimientos estadísticos, generalmente usados en la evaluación de factores de sitio: a) el análisis de variancia y b) el diagra-

GRUPOS DE SITIOS	PENDIENTE	CARACTERISTICA PRINCIPAL DEL SUELO	VALOR ESTIMADO	CLIMA
A	0-10 %	Muy profundo	> 65	DATOS POR ZONAS CLIMATICAS
B ₁		Moderado-muy profundo	65-45	
C		Moderado profundo hasta superficial y, o encharcado	45-35	
B ₁		Superficial y, o anmo oriforme	< 35	
B ₂	10-20 %	Muy profundo	> 55	
C ₂		Moderado a muy profundo	55-35	
D ₂		Moderado profundo hasta superficial y, o encharcado	< 35	
E	> 20 %	no hay datos	no hay datos	

A

B₁, B₂
C₁, C₂

ORDEN DE EVALUACION DESCENDENTE :

Sitios malos : D₁ (condicionado por prop. edáficas)
D₂ (condicionado por prop. edáficas más pendiente)
D₃ (condicionado por pendiente)

ZONAS CLIMATICAS	TEMPERATURA PROMEDIO ANUAL	PRECIP. PROM. ANUAL (mm)	CLIMA
I	> 24°C	1000 - 2500	Ca. h.
II	18 - 24°C	1000 - 2500	T. h.
III	12 - 16°C	600 - 1000	F. sh.
IV	< 12°C	600	F. s.

Ca. h : caliente húmedo
T. h : templado húmedo
F. sh : frío sub-húmedo
F. s : frío seco

FIG. 40. Un modelo para agrupar sitios según características edáficas, fisiográficas y climáticas.

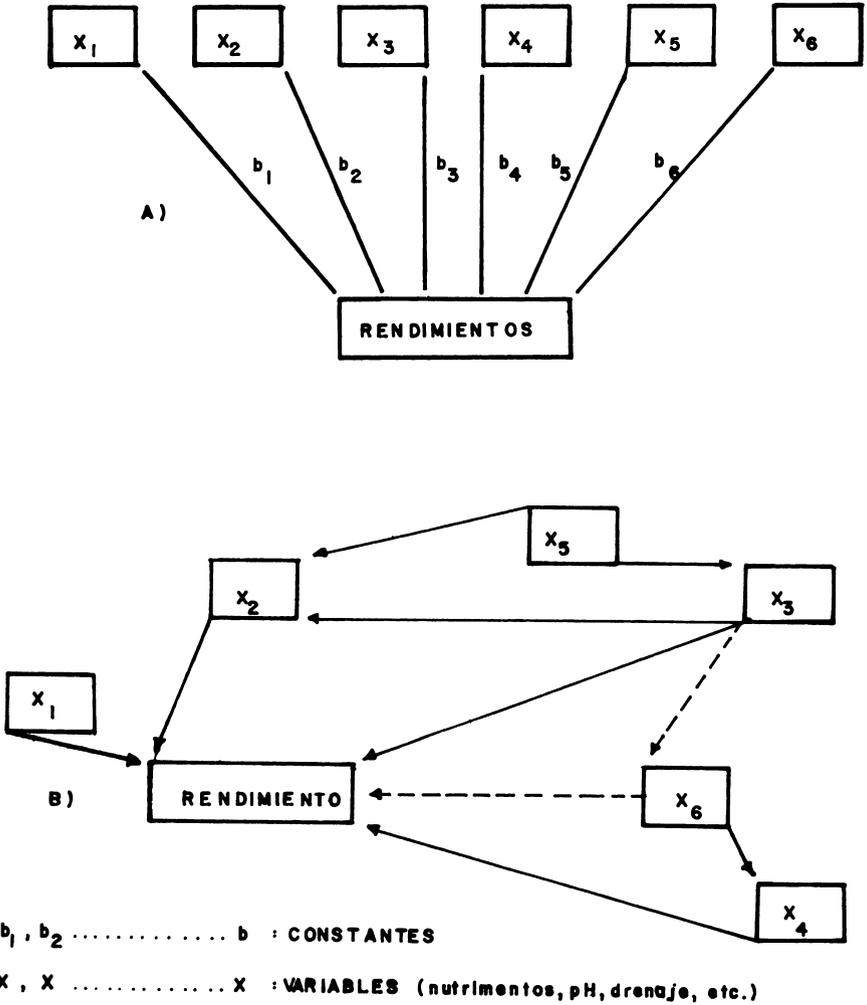


FIG. 41. Modelo estadístico generalmente usado en los estudios de clasificación de índices de sitio.
 a) Análisis de variancia.
 b) Diagrama de ruta.

ma de ruta. El análisis de variancia explica la influencia de uno o varios factores en el rendimiento vegetal o en la productividad del sitio, por medio de una ecuación: $Y = f(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$. Este método de evaluación no explica, sin embargo, si un determinado factor influye directamente en el comportamiento de la vegetación; o si esta influencia es ejercida sobre otro factor, modificándolo y haciendo que éste a su vez modifique el sitio. Esto lo investiga el diagrama de ruta, ilustrado en la misma figura. Una consideración detallada de los métodos estadísticos de evaluación, en los estudios de índices de sitio, se halla fuera de los objetivos de este capítulo; únicamente se desea poner énfasis en su importancia.

Las limitaciones inherentes a los estudios sobre índices de sitio obligan a desarrollar modelos de evaluación locales y regionales, que sean funcionales para tratar de aplicarlos en otras zonas distintas y así agrandar la red de sitios evaluados.

La textura como factor de sitio

La textura, o cualquier otra característica simple del suelo, rara vez determina la calidad de sitio. Sin embargo, puede observarse que, como regla general, los suelos francos son más favorables para crecimiento del bosque que cualquier otro arenoso grueso o arcilloso fino. Frecuentemente la influencia en la textura sobre el crecimiento de las especies forestales resulta enmascarada por la influencia de otros factores más significativos (clima, plagas, enfermedades, valor genético y otros).

La experiencia general indica que suelos profundos, arenosos y gruesos generalmente soportan plantaciones forestales relativamente pobres (caso del pino en arenas podsolizadas de Suriname y en Entisoles arenosos de Colombia). Las investigaciones han reportado frecuentemente que el contenido de material inferior a 0.2 mm, en suelos arenosos, tiene un valor importante sobre la calidad de sitio. Siendo iguales otros factores, la calidad de sitio de suelos arenosos aumenta en proporción del material inferior a 0.2 mm. La presencia de horizontes que contengan materiales de textura fina en el subsuelo, puede compensarse por materiales de textura gruesa en los horizontes superiores. Otros autores han reportado que la regeneración y crecimiento del pino ponderosa, sobre suelos profundos de ceniza volcánica en el sudoeste de EUA., es comúnmente pobre (Pritchett⁹³). Sin embargo, los suelos subyacentes de ceniza, arcillosos o francos,

producen buen crecimiento, una vez que las raíces han logrado los horizontes de textura más pesada. Suelos arcillosos muy pesados, también pueden inhibir la regeneración y el subsecuente crecimiento de los árboles.

En regiones áridas y semiáridas, los suelos de textura fina son apropiados para pastos, mientras que los suelos arenosos favorecen el crecimiento de los árboles. Las condiciones más favorables para el crecimiento de los árboles sobre suelos arenosos, en regiones secas, parecen estar asociadas con grandes cantidades de humedad disponible.

FACTORES LIMITATIVOS PARA LA REFORESTACION EN SUELOS DE LADERA

Retención de humedad

La capacidad de un sitio para producir árboles depende fundamentalmente de que pueda satisfacer su demanda de agua. Generalmente, la capacidad de almacenamiento de agua de los Andosoles es grande, debido en parte a su buena profundidad. No sucede lo mismo con los suelos desarrollados de arenisca, cuya profundidad no es suficiente para un almacenamiento de agua satisfactorio. El agua disponible ha probado ser hasta ahora el factor más importante para el crecimiento de muchas especies forestales, evidenciado por varios autores, entre ellos Pritchett⁹³; Slager y Schulz¹¹⁷; Vincent¹³⁵; von Christen¹⁹; De las Salas y Bongcam¹⁰²; Fassbender *et al*³⁵.

Drenaje interno

El drenaje interno en el suelo depende de la textura y de la pendiente, ya que algunos suelos deficientemente drenados pueden compensar esta deficiencia con un drenaje lateral. Esta característica edáfica es muy importante en la selección de sitios para reforestar. Afortunadamente los suelos Andosoles de las cordilleras son bien drenados, aunque pueden existir excepciones. En terrenos utilizados intensivamente para ganadería y luego abandonados, el drenaje interno puede estar impedido en los primeros 5 a 10 cm. Antes de plantar se requiere preparar el suelo.

Profundidad efectiva

El volumen de suelo disponible para las raíces, dado por la profundidad efectiva, influye en el crecimiento del árbol, hasta el punto de que puede afectar el suministro de nutrimentos y humedad, el desarrollo adecuado de raíces y su soporte contra el viento.

La profundidad del suelo define el espacio de crecimiento de las raíces sobre capas impermeables y otros horizontes de baja permeabilidad. En suelos bien drenados, la profundidad efectiva puede tomarse con cierta precisión como un parámetro para predecir tendencias de crecimiento. En especies de raíces superficiales como ciprés, la profundidad no puede tomarse en cuenta como factor de crecimiento. El fenómeno de volcado de los árboles de esta especie, en muchos sitios de los Andes colombianos con profundidad aceptable, no ha podido ser explicado satisfactoriamente. Parece que depende más del manejo mismo de las plantaciones que de los factores edáficos únicamente. En Australia, el crecimiento de *Pinus radiata* pudo expresarse como una función recíproca de la profundidad del suelo, encontrándose el mayor descenso en el crecimiento en suelos con profundidad efectiva inferior a 25 cm (Pritchett⁹³).

Nutrimentos

Los suelos de ladera del trópico, generalmente, han sido expuestos a una erosión continua durante muchos años, en parte debido a su uso inadecuado. Por lo tanto, su infertilidad se debe a la pérdida del horizonte orgánico mineral. Recientemente se ha comprobado que la infertilidad de algunos suelos antiguos en las cordilleras colombianas y probablemente venezolanas, se debe también a una fuerte meteorización de su material parental, durante el último levantamiento tectónico (Foelster y von Christen⁴¹).

En suelos disturbados, por lo corriente, las deficiencias nutricionales no son comunes, debido en gran parte a la naturaleza de la recirculación de nutrimentos y a la aparente capacidad de las raíces micorrizales de extraer nutrimentos disponibles, especialmente nitrógeno y fósforo. Este último se encuentra en proporciones altas como P - orgánico (entre 25 y 75%, según datos de Fassbender³³). La pérdida de la capa orgánica del suelo se lleva consigo importantes cantidades de P_i indispensable para el crecimiento de la planta. La pérdida va asociada también con el descenso del nivel de hidrógeno en la ma-

teria orgánica. Este elemento ha probado ser el más importante en la nutrición forestal de los trópicos y subtrópicos (Waring¹³⁷); sin embargo, las mejores respuestas a la fertilización con hidrógeno en coníferas se ha obtenido conjuntamente con la aplicación de fósforo.

En Colombia, se comprobaron deficiencias de N asociadas con el crecimiento inicial del ciprés (Tschinkel¹²⁸). Por otra parte, la mineralización de este elemento (en suelo fresco) probó tener estrecha relación con el índice de sitio de esta misma especie (del Valle¹³²). Recientemente, el boro resultó ser el factor limitativo del crecimiento de las coníferas, en suelos desarrollados de diabasa, en Colombia.

Otros factores

Existen otros factores (fisiográficos y edáficos) que, solos o combinados, influyen en la calidad del sitio para plantaciones forestales. Estos son: textura, aireación, nivel de capa freática, contenido de piedras y pendiente. Estos factores califican como determinantes de una condición de sitio, según la zona seleccionada para plantar. En el Cuadro 69 se resumen las propiedades edáficas y fisiográficas más importantes, relacionadas con la productividad del sitio para plantaciones forestales, en Colombia y algunos sitios del trópico americano. En las cordilleras andinas, la pendiente juega un papel importante en el establecimiento y manejo de plantaciones, debido a que puede originar una escorrentía superficial excesiva, acompañada de pérdidas apreciables de materia orgánica y nutrimentos.

CUADRO 69: Propiedades edáficas frecuentemente asociadas a la productividad sitio en plantaciones forestales del trópico

Autor	Especie	País y tipo de suelo	Característica edáfica
Ladrach, 1980	<i>C. lusitanica</i>	Colombia Andosoles	Micronutrimentos (boro)
Del Valle, 1976, 1979	<i>C. lusitanica</i>	Colombia Andosoles	N, P, Cap. retención agua, profundidad, N. mineralización
Tschinkel, 1972	<i>C. lusitanica</i>	Colombia Andosoles	N, P, pendiente
Giraldo, del Valle 1980	<i>C. alliodora</i>	Colombia Andosoles	pH, Cap. de interc. catiónico
Von Christen *	<i>P. caribaea</i>	Colombia Inceptisoles	Fertilidad, textura
Bongcam *	<i>E. globulus</i>	Colombia Inceptisoles Alfisoles	Profundidad, duripan (Bt), fertilidad
De las Salas/Bongcam 1981	<i>T. grandis</i>	Colombia Inceptisoles	Compactación, retención de humedad, erosión, concreciones de CaCO ₃

Continuación Cuadro 69.

Autor	Especie	País y tipo de suelo	Característica edáfica
De las Salas	<i>P. oocarpa</i>	Nicaragua Oxisoles	Fertilidad, erosión
Barros, N *	<i>E. grandis</i>	Brasil Inceptisoles	Retención humedad, fertilidad
Dyson, 1981	<i>P. caribaea</i>	Panamá Ultisoles	Fertilidad
Martínez, 1980	Pinos varios	Costa Rica Inceptisoles	Fósforo, textura, pendiente
Vincent, 1978	<i>P. caribaea</i>	Venezuela Inceptisoles	Retención de humedad
Slager y Schulz, 1969	<i>P. caribaea</i>	Surinam Spodosoles	Agua de fondo, retención de humedad, mat. org., bioporos.
Von Christen *	<i>E. saligna</i>	Oxisoles Suráfrica	Agua de fondo
Procter, 1967	<i>P. patula</i>	Ultisoles Tanzania	Boro
FAO, 1974	<i>Eucalyptus</i>	Andosoles Nigeria	Boro
Lamb, 1973	<i>P. caribaea</i>	Tanzania	Fósforo, nitrógeno, retención de humedad.

* Comunicación personal.

Espacio aéreo

La difusión es el mecanismo más importante para facilitar el intercambio de gases entre el aire del suelo y la atmósfera. Esta difusión se realiza hacia afuera, con CO_2 , y hacia adentro con O_2 . La capacidad de difusión del suelo depende de su espacio aéreo.

El espacio aéreo es igual a la porosidad total menos la humedad volumétrica. Esto quiere decir que, si la humedad aumenta (suelos mal drenados) o si la porosidad total se reduce (compactación del suelo), el espacio aéreo disminuye. Una buena aireación favorece la absorción de agua y nutrimentos por la planta. Forsythe⁴⁴ comenta sobre valores de aireación requeridos por el frijol R-27 (25%) y por la caña de azúcar (11%), aunque estima que un valor de 10% se usa como guía para cualquier cultivo en general, cuando no se dispone de datos.

Una aireación deficiente se ha juzgado repetidas veces como responsable del pobre desarrollo de árboles forestales. Sin embargo, existen pocos datos en la literatura que hagan evidente semejante afirmación.

La capacidad de aire del suelo está influida principalmente por la vegetación, la textura y el contenido de materia orgánica. Estos factores merecen investigarse en detalle.

EL MANEJO DE LOS FACTORES EDAFICOS

Indicadores edáficos

En la fertilidad de suelos se exige una evaluación cuidadosa del estado de nutrimentos del suelo, con el fin de programar una aplicación correcta de los fertilizantes necesarios a los requerimientos de las plantas o de utilizar otra fuente de nutrimentos adecuada (*mulch*, abonadura verde, encalado y otros). Los factores físicos del suelo juegan también un papel importante en su evaluación como sitio para plantas. Un valor de prueba de suelo *per se* (*soil-text value*) es una cifra empírica de escaso significado, a menos que se relacione con el rendimiento de cosechas o con variables de respuesta. Es sorprendente que se haya trabajado por muchos años con la química del suelo y que existan realmente tan pocos **indicadores edáficos**. El método del elemento faltante, basado en la ley del mínimo de Justus von Liebig, ha sido utilizado con éxito en la agricultura y tal vez podría utilizarse en especies forestales. Existen tan pocos parámetros edáficos, realmente indicadores del estado del suelo, que deberíamos agotar su "fuerza de predicción" en el comportamiento de cultivos agrícolas o forestales, solos o combinados. Algunos de estos parámetros son los siguientes: pF, basado en las relaciones cantidad (Q), Intensidad (I); pH, relaciones carbono-nitrógeno, carbono-fósforo; Índice de Textura de Hardy, Índice de Aireación; Potenciales de Schofield. Para los nutrimentos, Sing¹¹⁸ describe cómo podrían construirse índices de "disponibilidad" para N, P, Ca, Mg y micronutrimentos, dependiendo de los métodos de laboratorio utilizados.

Las relaciones Q/I para nutrimentos son comparables a la curva de retención de humedad (curva de pF). La cantidad (Q) aquí está dada por la reserva de nutrimentos y la intensidad (I) por su contenido energético. Estas relaciones permiten hacer las siguientes deducciones: 1. Estimar la magnitud de la reserva de nutrimentos disponibles para la planta, utilizando el conocimiento de valores potenciales críticos, como por ejemplo el punto de marchitamiento permanente; 2. detectar los efectos del aumento de nutrimentos (p.e., fertilización) sobre los Potenciales de Schofield.

Para los nutrimentos del suelo, la relación Q/I representa un análisis momentáneo. El significado ecológico de tal análisis radica en la posibilidad de comparación, en primer lugar, del estado de fertilidad de diferentes suelos por medio de una correlación simultánea con el crecimiento o el rendimiento de árboles o cultivos; y en segun-

do lugar, la comparación del estado de fertilidad del mismo suelo después de la influencia de un factor cualquiera (p.e., inclusión de árboles en cultivos anuales o perennes, arreglos espaciales o cronológicos de cultivos). La primera posibilidad conduce a la evaluación de diferentes estados del suelo, relacionados con la producción; la segunda posibilidad permite vistazos en las relaciones recíprocas entre suelo y planta.

Las relaciones C-N y C-P (org.) permiten deducir el estado de metabolismo orgánico del suelo en general e, indirectamente, el tipo de humus. Valores C-N mayores de 20 y C-P (org.) mayores de 600 revelan formas desfavorables de humus. Esto indica una descomposición de la materia orgánica más lenta y, por consiguiente, menor disponibilidad de nitrógeno asimilable para las plantas.

Las consideraciones hechas sobre ciertos indicadores edáficos ponen en evidencia la ventaja de trabajar con ellos, en lugar de utilizar datos aislados. Tal ventaja se refleja en poder comparar suelos y ambientes diferentes o similares, y llegar a elaborar **modelos de predicción** de productividad de sitios forestales extrapolables.

Necesidades de investigación

El requerimiento de la investigación básica es tan alto, que necesita un esfuerzo institucional cooperativo. Los 40 ensayos de proveniencia con especies forestales, conducidos por el C.F.I. de Oxford, los cuales están distribuidos en muchas partes de los trópicos, pueden servir como un ejemplo de este tipo de investigación.

A continuación se da una lista de investigaciones básicas y aplicadas para mejorar la productividad de los sitios forestales:

- selección de especies;
- requerimientos de las especies;
- estudios sobre nutrimentos y el balance hídrico;
- ensayos de fertilización; ensayos con plantaciones mixtas;
- métodos de manejo del suelo;
- modelos de predicción para el tiempo de cosecha;
- sistemas para controlar los cambios en el suelo;
- biología de la descomposición de la hojarasca;

rotación de cultivos y plantaciones intercaladas;
experimentos sobre método de aclareo.

LOS NUTRIMENTOS EN LAS PLANTACIONES FORESTALES

Problemas de nutrición forestal en los trópicos y subtropicos

La experiencia pasada de Australia y Nueva Zelanda en sus bosques de coníferas, ofrece elementos muy valiosos para emprender alternativas de manejo silvicultural de bosques de coníferas en los trópicos americanos. Estos dos países se dieron cuenta de su extraordinario potencial y explotaron rápidamente extensos rodales de especies valiosas. Como apunta Waring¹³⁷, ello fue probablemente inevitable, toda vez que la actividad extractora de maderas generó divisas necesarias para la apertura de la frontera agrícola de estos países.

En Nueva Zelanda se tienen extensas plantaciones de *Pinus radiata*, mientras que en Australia se posee gran experiencia en el manejo de varias especies de eucalipto. El problema de la fertilización forestal, en plantaciones tropicales, consiste en conocer las dosis exactas y más económicas de los fertilizantes necesarios para el crecimiento óptimo de las plantaciones y la justificación económica de tales inversiones. Recientemente se ha cuestionado el manejo del bosque mixto tropical, por ser en primer lugar demasiado costoso y en segundo lugar porque su manejo se ha orientado hacia otros usos del bosque, como agua, recreación, vida silvestre y conservación. El mayor énfasis en la fertilización forestal debe darse a especies conocidas de alto valor comercial, tomando como ejemplo países que como Australia y Nueva Zelanda tienen gran experiencia y sufrieron fracasos en sus comienzos. Waring¹³⁷ opina que en los países tropicales americanos debe comenzarse a dar la importancia que merece a la nutrición forestal, así como se le ha dado en la agricultura, y pone el ejemplo de las extensas plantaciones de caucho de Malasia.

En América Tropical, se cuentan hoy día millones de hectáreas de plantación con especies de rápido crecimiento: Brasil (*Eucalyptus*, *Gmelina*: más de 2 millones de hectáreas); Venezuela (Pino: 90 000 hectáreas); Colombia (pino y ciprés: 100 000 hectáreas).

En estos países se han iniciado programas de fertilización en nuevas áreas, destinadas a reforestación comercial. La experiencia de Nueva Zelandia y Australia con *Pinus radiata* muestra dos aspectos importantes.

1. Se prestó atención especial a la interacción nitrógeno-fósforo, con el objeto de permitir un potencial de crecimiento total del sitio y su relación con la plantación en el estado de crecimiento más temprano posible.
2. El estímulo temprano en la vida del árbol fue muy importante, lo cual resultó en ganancias de producción permanente y por largo tiempo. Los programas de fertilización mostraron las ventajas de tomar períodos en los cuales el árbol podía crecer libre de competencia de malezas y otros factores.

En años recientes, el establecimiento de extensas plantaciones en los trópicos ha centrado su atención en el mejoramiento del sitio en general y en el uso de fertilizantes en particular. Una producción alta de especies forestales, de turno corto, presupone una utilización intensiva del sitio, de tal modo que minimice las diferencias de productividad con las cosechas agrícolas.

Para mejorar el crecimiento de las especies forestales adaptadas al trópico, es necesario estudiar las relaciones entre el árbol y los factores de sitio o del ambiente. Esta tarea debe emprenderse, considerando el problema nutricional, desde varios aspectos: suelo, planta y deficiencias nutricionales. Los estudios correspondientes deberían incluir.

1. Reconocimiento del suelo y su clasificación como sitio para plantaciones forestales.
2. Análisis de suelo y foliares, desarrollando correlaciones entre la concentración de nutrimentos y el crecimiento como un elemento de referencia, a comprobar con resultados experimentales de campo.
3. Bioensayos (o ensayos de macetas), que utilicen la técnica del elemento faltante, con el objeto de detectar deficiencias nutricionales y niveles críticos en el follaje de las especies, en su etapa inicial de desarrollo. Estos bioensayos deben servir como punto de apoyo para el reconocimiento de la demanda de nutrimentos del arbolito, mientras se conducen ensayos de campo.

4. Ensayos de campo de corta duración (de dos a cinco años), que usen diseños experimentales para obtener información básica cuantitativa sobre la demanda de nutrimentos de la(s) especie(s) forestal(es) y su efecto sobre los parámetros de crecimiento.
5. Ensayos de campo de larga duración (más de cinco años), diseñados para la obtención de información sobre el rendimiento de las plantaciones y los costos de los tratamientos que han probado ser efectivos en el incremento de la producción y/o el mejoramiento del sitio.

Los problemas nutricionales en las plantaciones forestales, en el inmediato plazo, deben poder resolverse con la fertilización, formulando ensayos con los criterios siguientes:

1. identificar nutrimentos;
2. determinar dosis adecuadas;
3. evaluar tipos de fertilización;
4. conocer el grado de duración de las respuestas en función de dosis y frecuencias de aplicación.

La fertilización controlada y continuada en plantaciones forestales establecidas debe pretender, a largo plazo, lograr:

1. árboles más vigorosos;
2. mayores rendimientos en m^3 /ha;
3. madera de mejor calidad;
4. costos compatibles con el producto deseado.

Waring¹³⁷ comenta que, en la práctica, el factor nutricional más importante que afecta la producción forestal, como en agricultura, se centra, en la mayoría de los casos, en la deficiencia o desbalance de elementos mayores. El mismo autor afirma que, en áreas de alta producción agrícola o forestal, deficiencias adicionales son inducidas frecuentemente después de un período de fertilización con elementos encontrados inicialmente deficientes. Pone, como ejemplo, las deficiencias de potasio, azufre y magnesio, las cuales se desarrollan después de la utilización de fertilizantes nitrogenados y fosfóricos. Más a menudo, en el campo forestal, las deficiencias se desarrollan con el tiempo, debido al agotamiento de las reservas de elementos presentes originalmente a niveles marginales. El autor citado refiere que las dos

especies más favorecidas en Malasia (*Pinus caribaea* var, *hondurensis* y *Pinus oocarpa*) presentan la misma tasa de crecimiento rápido que el *Pinus radiata* y el *Eucalyptus*, siempre que el agua, la temperatura y los nutrimentos no sean limitativos. Señala que el lento crecimiento y el estado enfermizo de muchas plantaciones de pino, en Malasia, se atribuyen a deficiencias de boro, nitrógeno y fósforo, unidas a fuerte competencia de malezas.

Von Christen²¹ atribuye gran parte del problema de la nutrición forestal a la infertilidad natural de los suelos forestales.

Elementos nutritivos

De los elementos químicos conocidos, 16 se consideran esenciales para el crecimiento de la planta. Estos son: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), hierro (Fe), manganeso (Mn), cinc (Zn), cobre (Cu), boro (B), molibdeno (Mo) y cloro (Cl).

Las plantas extraen del aire y del agua el carbono, el hidrógeno y el oxígeno, con los cuales fabrican hidratos de carbono y otras sustancias. Para este proceso, necesitan la luz como fuente de energía.

Los demás elementos nutritivos se encuentran en los minerales o en la materia orgánica del suelo y son absorbidos por las raíces en forma iónica. Según las cantidades presentes en el suelo y absorbidas por la planta, se distinguen macro y micro-elementos. A los primeros corresponden: N, P, K, Ca, Mg y S; a los segundos pertenecen: Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo y Cl. El Cuadro 70 desglosa los elementos esenciales y anota algunas de sus características.

Nitrógeno

El nitrógeno (N) es un elemento muy importante dentro de los nutrimentos del suelo. A diferencia de casi todos los demás, no procede de la roca madre al meteorizarse, sino que se encuentra en forma orgánica. Se asimila a través de procesos biológicos (amonificación, nitrificación). El nitrógeno es el elemento que más frecuentemente limita el crecimiento, cuando es deficitario en la planta. Deficiencias de este nutrimento han sido reportadas ampliamente en rodales de coníferas de la zona templada, en donde se desarrollan

gruesas capas de *litter* con amplias relaciones C:N (Pritchett⁹³; von Christen²¹; Wittich¹⁴⁴; White y Leaf¹⁴²; Laatsch⁷²). En las zonas tropicales, los árboles responden a la aplicación de nitrógeno, debido a las condiciones de empobrecimiento de estos suelos, como resultado de la rápida descomposición de la materia orgánica y la pérdida de elementos minerales por lavado.

Las plantas no pueden asimilar el nitrógeno, en su forma elemental (N_2), del aire ni el N-orgánico; lo asimilan como amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) con el concurso de los microorganismos, los cuales realizan los procesos de amonificación (*Pseudomonas* sp, *Penicillium* sp, *Clostridium* y otros) y nitrificación (*Nitrosomas*, *Nitrosococcus*, *Nitrobacter* y otros).

CUADRO 70: Elementos esenciales para las plantas

Elementos	Peso atómico	Concentración frecuente en los suelos, con base en la materia seca o/oo	Forma iónica en la cual son absorbidos	Concentración frecuente en las plantas, con base en la materia seca o/oo
N	14.0	0.3-3	NO_3^- ; (NH_4^+)	5-50
P	31.0	0.1-1	$H_2PO_4^-$; HPO_4^{2-}	1.5
S	32.1	0.1-1	SO_4^{2-}	0.5-5
K	39.1	2.30	K^+	5-50
Ca	40.1	2.15	Ca^{2+}	0.5-50
Mg	24.3	1-10	Mg^{2+}	1-10

Elementos	Peso atómico	Concentración frecuente en los suelos, con base en la materia seca ppm	Forma iónica en la cual es absorbida	Concentración frecuente en las plantas, con base en la materia seca ppm
Fe	55.9	5000 -- 40 000	Fe^{2+} ; (Fe-Quelato)	50 - 1000
Mn	54.9	200 - 40 000	Mn^{2+} ; (Mn-Quelato)	20 - 200
Zn	65.4	10 - 300	Zn^{2+} ; (Zn-Quelato)	10 - 100
Cu	63.5	5 - 100 (Promedio: 20)	Cu_2^{2+} ; (Cu-Quelato)	2 - 20
Cl	35.5	50 - 1000	Cl^-	200 - 10 000
B	10.8	5 - 100 (Promedio: 15)	$H_2BO_3^-$ HBO_3^{2-}	2 - 100
Mo	95.9	0.5-5	MoO_4^{2-}	0.2 - 10

1 o/oo = 0.1% 1 ppm = 0.0001%

FUENTE: Zöttl y Tschinkel¹⁴⁶.

Los procesos de mineralización e inmovilización del nitrógeno se trataron *in extenso* en el Cap. 9. Se aconseja también consultar otras publicaciones a quien desee profundizar en el tema (por ejemplo: Bartholomew^{8, 9}; Sánchez¹⁰⁶; Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo¹²⁰, Fassbender^{33, 34}; Svenson y Söderlund¹²⁶). Los procesos naturales de abastecimiento de nitrógeno incluyen (según Bartholomew^{8, 9}): 1) mineralización del nitrógeno de la materia orgánica y residuos de cultivos, y el proceso inverso de inmovilización en la descomposición de desechos de plantas y animales; 2) la fijación de nitrógeno en el atmósfera; 3) el nitrógeno añadido a través de lluvias y otras formas de precipitación; y 4) alguna liberación de nitrógeno a través de la meteorización de los minerales primarios del suelo.

Es importante anotar que el humus es la principal reserva de nitrógeno del suelo; de su manejo depende una sana economía de este nutrimento, ya que participa en la formación de todos los compuestos orgánicos importantes para el crecimiento, como proteínas, clorofila y nucleótidos.

El contenido total de nitrógeno en el suelo varía ampliamente, dependiendo del clima, la vegetación, la topografía y la intervención del hombre. Fassbender^{33, 34} fija un ámbito entre 0.02% y 4%, aunque en suelos muy ricos en materia orgánica este último valor puede ser mayor. Svenson y Söderlund¹²⁶ indican ámbitos de 1.7 a 7.9% del nitrógeno total y de 9 a 47.2%, como correspondientes al suelo superior y subsuperficial, respectivamente. Esta fracción, constituida por el nitrógeno insoluble, orgánico e inorgánico, representa el capital principal del elemento en el suelo.

El Cuadro 71 resume el contenido de dicho elemento en algunos suelos de América Latina. En el Cuadro, se observa que el tenor de nitrógeno de los suelos volcánicos es más alto que el de las zonas bajas del Brasil. Fassbender^{33, 34} atribuye este fenómeno a varias razones: a) rejuvenecimiento de los suelos por aportes nuevos de cenizas de las erupciones; b) formación de complejos organominerales que protegen a las sustancias nitrogenadas de la mineralización; c) actividad equilibrada de la microfauna.

Fósforo

El fósforo es uno de los elementos nutritivos limitativos más comunes en suelos antiguos tropicales (Oxisoles, Ultisoles) y en suelos

CUADRO 71: Contenido de C y N en algunos suelos de América

Autor(es)	Región	Tipo de suelo (grupo)	No. muestras	pH	Horizonte A		Horizonte B		
					% c	% N	% C	% N	
Sudamérica Vieira-Bornemisza	Amazonas	Latosol	7	4.80	3.10	0.20	5.30	0.47	0.03
		No latosol	5	5.30	2.47	0.23	5.62	0.47	0.03
	Amazonas	---	18	4.55	2.53	0.22	4.42	0.32	0.04
		---	19	3.90	2.41	0.11	3.70	0.65	0.06
	Amazonas	---	8	5.30	0.55	0.66	---	---	---
		Bahía	8	6.00	1.42	0.17	5.40	0.57	0.03
	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
Blasco	Pantano	---	5.50	6.8	0.92	5.3	7.90	0.95	
	Andosol, Subalpino (Colombia)	6	5.31	6.30	0.50	---	---	---	
FAO	Llanos (Colombia)	Montano	6	6.01	3.19	0.33	---	---	---
		Subtrópico	3	5.18	2.57	0.27	---	---	---
		Tropical	6	5.60	6.31	0.70	---	---	---
FAO	Sudamérica	Acrisoles	10	4.70	1.36	0.16	---	---	---
		Ferrasoles	10	4.85	2.21	0.18	4.86	0.56	0.063
		Cambisoles	6	4.66	2.75	0.22	5.10	1.00	0.078
América Central Díaz-Romeu, Balardi y Fassbender	Amazonas	---	6	5.06	3.70	0.37	5.10	1.10	0.11
		---	56	5.58	3.06	0.39	5.12	0.70	0.037
	Llanos	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
	Amazonas	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
	Amazonas	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
	Amazonas	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
Amazonas	Vertisoles	2	5.95	1.75	0.18	5.30	1.70	0.080	

FUENTE: Fassbender^{33,34}. Reproducido con permiso del Editor, serie Libros y Materiales Educativos (IICA), San José, Costa Rica.

de Cordillera (Andosoles y Vertisoles). Por acusar serias deficiencias y altas tasas de fijación, este nutrimento ha sido uno de los más estudiados en el trópico. Como se halla documentado extensamente (ver, por ejemplo: Sánchez¹⁰⁶; Fassbender^{33, 34}; Kamprath⁶⁸), sólo nos referiremos al fósforo en sus aspectos esenciales y como factor de crecimiento en la nutrición forestal.

El contenido total de fósforo es muy variable en los suelos tropicales, ya que depende de su estado de meteorización y de su contenido de materia orgánica. Sánchez¹⁰⁶ reporta tenores de fósforo para suelos venezolanos entre 59 y 692 ppm, en la capa arable, mientras que para un *Eutrustox* del Brasil informa sobre un contenido de 3760 ppm. Para suelos Ultisoles y Alfisoles da un nivel de 200 ppm, recopilando información de otros autores. Fassbender^{33, 34} presenta ámbitos en fósforo total, para suelos de ceniza volcánica (*Andepts*) de América Central, de entre 1000 y 3000 ppm. Kamprath⁶⁸ recopiló datos sobre el contenido de fósforo total de suelos brasileños y colombianos; reporta el mínimo valor (179 ppm) para un Oxisol y el máximo (1465 ppm) para un suelo volcánico, ambos colombianos. Una Terra Roxa del Brasil alcanzó 467 ppm.

El fósforo orgánico participa normalmente entre 20 y 50% en el fósforo total, en la capa arable del suelo, aunque Blasco¹¹ reporta cifras entre 5 y 90%, en regiones como la Amazonía brasileña, Centroamérica y Ghana. Los suelos altamente meteorizados poseen del 60 al 80% de fósforo total en forma orgánica.

El Cuadro 72 da idea del fósforo total y de las fracciones más relevantes en el comportamiento de este elemento, en algunas regiones tropicales americanas.

Las relaciones C:P, N:P son indicadores útiles del grado de mineralización del fósforo y de su disponibilidad para la planta. En suelos africanos, la relación C:P de la materia orgánica es de 240:1 y N:P de 20:1 (Sánchez¹⁰⁶). Estos son rangos amplios e indicativos de una deficiencia de fósforo.

En los bosques, y especialmente en las plantaciones forestales, es muy importante conservar la materia orgánica del suelo y con ella el nivel de fósforo. En el trópico se han perdido grandes cantidades de suelo superficial y con él también muchas toneladas de fósforo. El hecho es particularmente importante en las cordilleras andinas, donde generalmente los suelos presentan serias deficiencias de este elemento, debido a su alta fijación por la presencia de alófana o al arrastre de la capa arable por erosión.

CUADRO 72: Distribución de las fracciones de fósforo total en la capa arable de algunos suelos latinoamericanos

	País, región	Suelo	Total	A1-P	Fe-P	Ca-P	Org.	% P org.
Westin y Brito 1/	Venezuela	Oxisol	59	2	17	0	11	18.6
Westin y Brito	Venezuela	Entisol	298	20	33	88	79	26.5
Hase, 1981	Venezuela	Inceptisol	550	41	152	28	79	14.4
Fassbender y Díaz 2/	Brasil, Maranhao	-----	600	17	21	15	437	73
Vieira y Bornemisza 2/	Brasil, Amazonas	Oxisol	369	52	37	10	147	40
Fassbender 2/	América Central	Andosoles	1142	92	55	124	496	43
Benavides 2/	Colombia	Oxisol	151	1.35	16.6	0.9	113	75
Blasco 3/	Colombia	Andosol	1467	214	207	27	136	9
Blasco 3/	Colombia, Amazonas	-----	340	16	70	3	219	65

1/ Original no consultado. Datos tomados de Sánchez¹⁰⁶ con autorización del Editor de la Serie de Libros y Materiales Educativos del IICA, San José, Costa Rica.

2/ Original no consultado. Datos tomados de Fassbender^{33,34} con autorización del Editor anterior.

3/ Original no consultado. Datos tomados de Guerrero^{51,52}.

Potasio

Las fuentes principales de potasio del suelo se encuentran en los feldspatos (*ortosa, sanidita, microclina*), en las micas (*muscovita, biotita*) y en las arcillas (*ilita, vermiculita, glauconita*). En la ceniza volcánica de tipo ácido es donde se encuentran frecuentemente los feldspatos potásicos (Luna y Suárez⁷⁹). Estos autores comentan que, en suelos *Andepts*, el humus y la alófana absorben débilmente el potasio y que su grado de adsorción disminuye al aumentar los contenidos de humus, alófana y acidez del suelo. Fassbender^{33, 34} indica que el contenido de potasio varía en los suelos, generalmente entre 0.04 y 3% y, en casos excepcionales (suelos alcalinos), hasta el 8%. Anota también que ese contenido es muy variable en los suelos tropicales. Cita estudios de Moss y Coulter, quienes hallaron valores de potasio total en Trinidad de 0.11 a 1.9%. Martini (citado por Luna y Suárez⁷⁹) encontró para suelos de Centro América un contenido de potasio mínimo de 0.1 me/100 g, máximo de 5.4 me/100 g y promedio de 6 me/100 g. Para Colombia, Luna y Suárez⁷⁹ informan sobre contenidos mínimos de 0,01 y máximo de 1.80 me/100 g de suelo en los primeros 20 centímetros (potasio extractable en NH₄. OAc 1N). Los contenidos de potasio total en suelos de Costa Rica variaron según Suárez (citado por Fassbender^{33, 34}) de 0.30 a 0.37% (aluviales), de 0.06 a 1.61% (Andosoles) y de 0.024 a 0.194% (Oxisoles).

Los suelos arcillosos frecuentemente tienen un contenido adecuado de potasio; por el contrario, los suelos arenosos presentan a menudo deficiencias, debido a su fácil lavado. En suelos calcáreos, la asimilación del potasio (como ión K^+) se ve frenada, debido al antagonismo existente entre los iones K^+ y Ca^{2+} . El estudio de las formas de potasio (intercambiable, no intercambiable, soluble en agua, estructural) en el suelo y en las fracciones de arena, limo y arcilla tiene un gran significado para la fertilización potásica. Luna y Suárez⁷⁹ opinan que los métodos de extracción del potasio en el suelo, para fines de recomendación de fertilizantes, tienen valor práctico cuando se efectúan con base en la experimentación biológica. Aunque el potasio no es componente de los tejidos vegetales, desempeña una función clara en la activación enzimática.

Azufre y magnesio

En los suelos tropicales, el azufre juega un papel importante, ya que su ciclo está asociado al del nitrógeno (ver Cap. 9). Se presenta en los suelos en forma orgánica e inorgánica. Su asimilación por la planta se realiza al mineralizarse el S orgánico. Del 60 al 90% del azufre se presenta en forma orgánica. Fassbender^{33, 34} recopiló datos sobre contenidos de azufre total en suelos de Costa Rica y África y sitúa valores entre 1000 y 2000 mg S/Kg de suelo; la contribución del S orgánico no sobrepasa el 35%. Para suelos de África (Kenia y Tanzania), indica ámbitos entre 355 y 750 mg S/kg de suelo, pero la participación del S orgánico alcanza 100%. Según Sánchez¹⁰⁶, los suelos deficientes en azufre presentan generalmente una o más de las propiedades siguientes: son altos en alófana u óxidos, bajos en materia orgánica y frecuentemente arenosos. Por otro lado, como el azufre se volatiliza en grandes cantidades, por efecto de las quemadas (más del 60%), es frecuente encontrar deficiencias de este elemento en suelos sometidos a agricultura migratoria.

El S orgánico se mineraliza en forma similar al nitrógeno orgánico y sus tasas de mineralización oscilan entre 1 y 10%/año. Estas tasas son bajas en suelos Andosoles, debido a que la materia orgánica se asocia con la alófana.

El azufre inorgánico está representado por iones SO_4^{2-} , los cuales se encuentran en bajas cantidades, generalmente asociados con Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ . Sánchez¹⁰⁶ anota que el solo aporte de S por la lluvia (aproximadamente, 10 Kg/ha/año) es cantidad suficiente para

prevenir deficiencias en el suelo. Los fertilizantes que contienen azufre (sulfato de amonio, superfosfato simple) adicionan al suelo importantes cantidades de este elemento. Los suelos con altos contenidos de óxido de hierro o de aluminio, o alófana, absorben fácilmente los iones sulfato, debido a su alta capacidad de intercambio aniónico.

El magnesio forma parte de las rocas carbonatadas, como la dolomita, y se encuentra en varios minerales de rocas cristalinas (*biotita, olivina, anfibolita*). Se encuentra también en algunas arcillas (*montmorilonita, vermiculita*). Fassbender^{33, 34} registra ámbitos entre 0.1 y 1% de magnesio total para suelos no calcáreos. El magnesio adsorbido al complejo de intercambio catiónico de suelos de Honduras, Brasil, Hawaii y Costa Rica varió entre 0.5 y 10 mg/100 g de suelo, según datos recopilados por el mismo autor. El magnesio cambiante representa una proporción muy pequeña del Mg total. Las pérdidas de este elemento van asociadas a procesos de erosión, percolación y escorrentía. Recientes investigaciones han comprobado que el balance del Mg en el suelo no se altera debido a las quemas.

Síntomas visuales de deficiencia de los elementos nutritivos

Los síntomas visuales de deficiencia de nutrimentos en las plantas, aunque no son suficientes para un diagnóstico seguro, sí sirven para orientar ensayos de correctivos y fertilizantes, tendientes a compensar los niveles deficitarios del (o de los) elemento(s) limitativo(s) del crecimiento. Nunca pueden ser la única base para dar recomendaciones detalladas sobre necesidad de fertilizantes. Hay que aprovechar siempre datos provenientes de otros métodos, tales como el análisis químico del follaje o del suelo. Sin embargo, algunos signos que tienen cierta validez en árboles, ya sean coníferas o latifoliadas, se resumen como sigue, según Zöttl y Tschinkel¹⁴⁶:

Nitrógeno: Las hojas (y el árbol) son de tamaño pequeño. El follaje tiene un color amarillento o verde pálido. Las hojas inferiores pueden aparecer quemadas y mueren prematuramente. El contenido de clorofila es muy bajo. Las raíces son relativamente bien desarrolladas (crecimiento de hambre).

Fósforo: Las hojas son de color verde pálido y adquieren un tono purpúreo, bronceado o rojizo cuando envejecen. La fructificación es reducida. Desarrollan pocas raíces.

Azufre: Los síntomas son muy parecidos a los de deficiencia de nitrógeno y sólo se manifiestan muy raramente.

Potasio: Las hojas muestran moteados amarillentos, a partir del margen externo o de la ñunta (acículas). La parte más vieja del follaje demuestra primero el síntoma y finalmente se vuelve necrótica. Las hojas jóvenes quedan verdes.

Calcio: Las puntas de los brotes en la cima del árbol se tornan marrón y se secan. Las hojas en las partes intervenales toman coloración marrón y luego necrótica. El follaje, en la parte inferior del árbol, queda verde. En el campo nunca se han observado estos síntomas de deficiencias en coníferas.

Magnesio: Las latifoliadas adquieren un color amarillento en las partes intervenales de las hojas verdes. Posteriormente, las partes cloróticas se presentan como manchones oscuros, seguidos de necrosis.

Las acículas de las coníferas tienen las puntas amarillas, muchas veces amarillo oro. La clorosis comienza en las acículas viejas. La parte amarilla de la acícula se halla delimitada bruscamente con respecto a la zona verde. Más tarde, las puntas se ponen marrón y luego necróticas.

Es difícil diferenciar los síntomas de deficiencias de magnesio y de potasio.

Micronutrientes

Boro: El boro se trata brevemente en este capítulo, por ser uno de los elementos más importantes en la nutrición forestal. Puede generalizarse que, en los trópicos, la mayoría de las coníferas y eucaliptos presentan deficiencias de boro. Este elemento proviene de rocas ígneas y sedimentos marinos; su contenido en el suelo depende de factores como el material parental, el clima y la materia orgánica. Berger y Pratt (citados por Fassbender^{33, 34}), revisaron valores para boro total en el suelo y encontraron tenores de entre 20 y 200 ppm y entre 0.05 y 5 ppm, para boro soluble en las capas superficiales de regiones húmedas. Adicionalmente, los autores indican que entre las fuentes principales de boro en el suelo se encuentran la turmalina, el agua de lluvia y los fertilizantes.

El boro inorgánico, disuelto en la solución del suelo, se encuentra en las formas siguientes (Fassbender^{33, 34}): ácido bórico, boratos, integrado al complejo coloidal y como parte de algunos minerales.

Existen escasos datos sobre el contenido de boro en los suelos del área tropical. En Hawaii, Okazaki y Chao (citados por Fassbender^{33, 34}.) dan cuenta de valores de boro disponible entre 0.3 y 0.7 ppm. En Costa Rica, se encontraron contenidos que oscilaron entre 0.9 y 3.7 ppm (Rímolo, en Fassbender^{33, 34}). Coy²⁶ obtuvo valores, para una región de Colombia (Valle del Cauca), desde 0.18 hasta 0.73 ppm en los primeros 30 cm de suelo. Garavito y León⁴⁷, en un estudio sobre propiedades del suelo y su relación con deficiencias de boro, concluyeron que suelos clasificados como *Vertic calciustolls* presentaron deficiencias de boro con contenidos totales de entre 10 y 15 ppm. Tales suelos se caracterizaron por: contenidos altos de CaCO₃, pH mayor de 7.3, abundancia de vermiculita y desarrollo de características vérticas, menos de 2% de carbono orgánico, menos de 0.3 ppm de boro soluble en agua caliente y ausencia de turmalina u otro mineral portador de boro.

La adsorción del boro depende del pH y aumenta con el encalado de los suelos, produciendo una disminución en la disponibilidad de este elemento. Esto ha sido comprobado por varios investigadores (Rímolo, en Fassbender^{33, 34}; Garavito y León⁴⁷; Gupta⁵³; Jones y Scarseth⁶⁶; Scott, Beasley y Thompson¹¹³, entre otros).

El fenómeno de la baja disponibilidad de boro ha sido atribuido a la formación de precipitados, particularmente de sílice y aluminio, y a la marcada afinidad que tienen por el boro los hidróxidos de hierro y aluminio (Fassbender³⁵; Rímolo, en Fassbender^{33, 34}; Bornemisza, comunicación personal; Parks y Shaw⁸⁹). Estos procesos han sido enmarcados dentro del concepto de fijación del boro.

Los pH alcalinos y la materia orgánica han sido relacionados con la baja disponibilidad de boro en el suelo. Se ha observado que la materia orgánica retiene altas cantidades de este elemento, pero a su vez sirve de fuente de boro y lo libera a medida que se descompone. Por otra parte, se ha comprobado que la máxima disponibilidad de boro en el suelo se obtiene en ámbitos de pH, entre 4.5 y 6.3 (Garavito y León⁴⁷; Peterson y Newman⁹⁰; Oertli y Gregurevic⁸⁸). Los síntomas de deficiencia de boro son característicos y están reseñados por varios autores (Zöttl y Tschinkel¹⁴⁶; Coy²⁶; Baule y Fricker¹⁰, entre otros). Pueden resumirse así:

1. Hojas pequeñas con clorosis, deformadas, más gruesas y quebradizas, con nervaduras endurecidas, algunas veces tonos carmelitos o rojos.
2. Muerte del meristema apical del tallo principal; regeneración a partir de yemas laterales auxiliares, dando un aspecto de arbusto (coníferas) con clorosis y márgenes necróticos; deformación de las hojas, con variaciones según las especies; probable crecimiento tortuoso del fuste.
3. Las raíces pueden ser oscuras, con un engrosamiento anormal en las puntas, y luego necróticas y ramificadas; drástica inhibición del desarrollo radical.
4. Alteración en la floración, que puede no ocurrir.
5. Frutos deformados con lesiones externas a internas; cortezas muy gruesas y cuarteadas o rajadas.

Otros elementos menores

El contenido de estos elementos en el suelo se puede resumir en la siguiente lista (Fassbender^{33, 34}):

Elemento	Contenido (ppm)	Elemento	Contenido Total (ppm)
Mo	0.3 – 5	Cu	0.6 – 27.6
Fe	1 – 17.5%	Cu	2 – 100 Cu
Mn	100 – 4000		
Zn	100 – 300		

El contenido total de estos elementos en los suelos puede variar dentro de rangos muy amplios, según el material parental y los procesos de meteorización.

Las características y funciones en la planta de los elementos menores mencionados están resumidos como sigue (Zöttl y Tschinkel¹⁴⁶):

El hierro (Fe) forma parte de muchos minerales. Puede encontrarse en el suelo en forma de Fe²⁺ o Fe³⁺ y ser tomado por las plan-

tas en ambas formas (como también en forma de quelato). La solubilidad de los compuestos de hierro disminuye al subir el valor del pH (suelos calcáreos). Es fácilmente asimilable en los suelos ácidos.

La planta necesita absolutamente de este elemento, pero sólo en cantidades menores, porque es componente de varios fermentos (por ejemplo, el *Zytochrom*). El Fe desempeña un papel importante en el metabolismo fisiológico, debido a su poder de cambio de valencia.

El **manganeso** (Mn) se encuentra en el suelo en forma de 2,3 y 4 valencias. El Mn^{2+} es bien asimilable y predomina en suelos ácidos y húmedos (pobre de oxígeno). En tales suelos nunca se encuentra deficiencia de tal elemento; por el contrario, a veces se sospecha un contenido demasiado fuerte que, eventualmente, podría causar concentraciones tóxicas en la planta.

Los compuestos con valencias altas tienen una solubilidad baja (por ejemplo, los óxidos). Por eso se entiende que existen suelos con suficientes reservas en Mn; pero de tan baja disponibilidad que las plantas sufren la deficiencia del elemento. La presencia de compuestos solubles disminuye a medida que aumenta el valor del pH. Por lo tanto, los suelos con horizontes calcáreos hasta la superficie (incluso suelos turbosos neutrocalcáreos) pueden presentar deficiencia de Mn. Lo mismo resulta muchas veces en los viveros que han recibido demasiada cal.

El manganeso es un microelemento que necesitan las plantas en los diferentes procesos fisiológicos que se hallan regulados por fermentos.

El **cinc** (Zn) puede encontrarse en cantidades insuficientes en los suelos arenosos ácidos y fuertemente lixiviados, sobre todo cuando se trata de subsuelos expuestos a la superficie por erosión. Además, su solubilidad es considerablemente reducida en suelos neutroalcalinos. La deficiencia de Zn, bastante frecuente en árboles frutales, no es conocida en bosques naturales y plantaciones forestales, con excepción de extensas plantaciones de pino en Australia. Ha sido un caso espectacular la deficiencia del microelemento en la historia de los *man-made forests*, lo que ha sido bien corregido al rociar una solución de sulfato de cinc sobre las acículas.

El Zn tiene la función de activar los fermentos en las plantas. De esta manera participa, por ejemplo, en la formación de auxinas.

El **cobre** (Cu) predomina en el suelo en forma de Cu^{2+} , como componente de algunos minerales y de complejos orgánicos. También es fijado en forma asimilable en los complejos de intercambio. Es conocida la deficiencia de este microelemento en cultivos que se levantan en suelos arenosos podsólicos (por ejemplo, en el norte de Alemania), incluso en los suelos ácidos turbosos. Estos suelos ya tienen reservas bastantes bajas de cobre y, además, lo fijan en forma no asimilable, cuando se aplica cal con el fin de elevar el Ph a valores adecuados para los cultivos. Parece que en los bosques naturales no falta el Cu, en tanto que las plantaciones hechas en suelos del tipo arriba mencionado muestran, a veces, estas deficiencias.

Es un microelemento poco móvil en la planta; se lo utiliza como componente de ciertos fermentos.

El **molibdeno** (Mo) es abundante en las rocas cristalinas. En el suelo puede ser fijado como molibdato MoO_4^{2-} (similar al fosfato). Esta fijación es tanto más fuerte cuanto más ácido sea el suelo. Este aumento de la solubilidad al subir el pH, distingue al molibdeno de los microelementos ya mencionados que reaccionan en forma contraria. El Mo es componente de los fermentos y tiene importancia sobre el metabolismo de los fosfatos y la reducción del nitrato. Prácticamente no se han observado deficiencias en árboles forestales. Sin embargo, el molibdeno merece atención en el sector de nutrición forestal, debido al papel central que desempeña en relación con la economía del nitrógeno. Es el elemento clave en la bioquímica de la fijación biológica del nitrógeno del aire. Todos estos microorganismos, incluso los que viven en los nódulos de las leguminosas, lo requieren en cantidades relativamente altas. Por lo tanto, las deficiencias de Mo influyen mucho sobre el suministro de nitrógeno en bosques u otros ecosistemas.

La concentración aproximada de micronutrientes en las hojas de plantas maduras está representada en el Cuadro 73.

CUADRO 73: Concentración aproximada de micronutrientes en las hojas de plantas maduras

Micronutriente	deficiente	Concentración (ppm) normal	tóxica
B	< 15	20 - 100	> 200
Cu	< 4	5 - 20	> 20
Fe	< 50	50 - 250	m.c.
Mn	< 20	20 - 500	> 500
Mo	< 0.1	0.50 - ---	n c
Zn	< 20	25 - 150	> 400

n c: no conocida

FUENTE: Mortvedt⁸⁴.

Síntomas de deficiencia

Como en el caso de los macroelementos, existen deficiencias de elementos menores en las plantas, cuyos síntomas más comunes se anotan a continuación, tomando como referencia el criterio de Zöttl y Tschinkel¹⁴⁶.

Hierro: las hojas jóvenes aparecen de color pálido blanco definido. En los casos extremos adquieren color marrón y posteriormente necrótico. En casos leves, las hojas más viejas se tornan progresivamente verdes desde la punta.

Manganeso: Las hojas exhiben manchas, rayas y puntos de color verde pálido y verde sucio. Las hojas jóvenes manifiestan primero este síntoma y posteriormente se vuelven necróticas.

Cobre: Las ápices de las hojas tiernas toman un color blanquecino. Los brotes y hojas jóvenes aparecen retorcidos.

Cinc: Las acículas de las coníferas presentan puntas de color oro y las bases de verde pálido.

Molibdeno: Los síntomas son similares a los del nitrógeno. Son muy raros o casi desconocidos en el área forestal.

Fertilización forestal

En este capítulo no se pretende tratar a fondo este tema pero se menciona y se orienta al lector sobre los problemas principales de la fertilización forestal en los trópicos americanos. Se aconseja al lector interesado consultar la siguiente literatura relevante: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo¹²⁰; Fried y Broeshard⁴⁶; Silva¹¹⁶; Baule y Fricker¹⁰; Coy²⁶; Tennessee Valley Authority¹²⁷; Zöttl y Tschinkel¹⁴⁶; Sánchez¹⁰⁶; Ballard⁶; Schultz^{110, 111}; Waring¹³⁷.

Existen muchas preguntas e inquietudes, que pueden contestarse solamente a través de programas de investigación, que incluyen ensayos planificados a lo largo de muchos años.

La infertilidad, en su mayor parte, es un problema creado por el hombre, pero la naturaleza tampoco es perfecta. Existe también una infertilidad natural, que debe corregirse, si aspiramos a rendimientos económicos de nuestras actividades silviculturales.

La fertilización forestal no es barata y fácilmente puede ocasionar pérdidas económicas. La fertilización más económica es la que podemos estimular a través de medidas silviculturales (selección de especies, limpias intensivas y otras). De todos modos, no podemos solucionar un problema de infertilidad en una forma efectiva si desconocemos las causales y demás factores del sitio que también influyen (von Christen^{19, 20, 21}).

Si se tiene en cuenta que en muchos casos la respuesta de los árboles a los fertilizantes permanece aún impredecible, variando de espectacular a nula, la iniciación de ensayos debe contar con análisis de suelo confiables; éstos son esenciales en cualquier caso, para evaluar el *status* nutricional del suelo antes de plantar, y para estudiar la movilidad de los nutrimentos adicionales en la fertilización. El análisis foliar es otra herramienta indispensable si se desea conocer la respuesta de la planta al fertilizante y estudiar los disturbios nutricionales en las plantaciones. Leaf y Madwick⁷⁵ comentan que, quizás por muchos años más, el medio más eficaz para determinar las deficiencias nutritivas será el ensayo de fertilizantes; pero un estudio prudente de los análisis de suelos y plantas, antes de dichos ensayos, puede ahorrar considerable tiempo y esfuerzo a los silvicultores. Un diseño de ensayos para el trópico deberá pretender:

1. Trabajar con diseños experimentales lo más simples posible para que se pueda demostrar claramente lo que se desea probar.
2. Utilizar interacciones para probar el efecto de combinaciones de tratamientos, antes que excesivas réplicas de éstos para obtener una precisión estadística innecesaria.
3. Ensayar fertilizantes comerciales y probar las deficiencias más obvias conocidas para las especies en otras regiones tropicales y subtropicales.

Es importante anotar el hecho de que los programas de fertilización forestal, en países avanzados en este campo como Australia y Nueva Zelandia, han utilizado de preferencia el fósforo y el nitrógeno y sus interacciones como fertilizantes en eucaliptos y coníferas con resultados sorprendentes.

Waring¹³⁷ atribuyó el lento crecimiento de muchas plantaciones de pino, en Malasia, a deficiencias de nitrógeno, fósforo y boro. Los análisis foliares de *Pinus caribaea*, plantados en diferentes sitios, mostraron muy bajos niveles de estos tres elementos.

La práctica del uso de fertilizantes en plantaciones forestales, en el trópico americano, es muy reciente y sólo se intensificó en los últimos años en Brasil, Venezuela y en cierta medida en Colombia, debido a las ganancias obtenidas con los mejores rendimientos de las plantaciones.

En la aplicación de fertilizantes, se deben tener en cuenta las características edáficas y climáticas, la naturaleza y propiedades de las plantas, sus exigencias de nutrimentos, su sistema radical, el manejo del suelo, el tipo de producción (manejo silvicultural) y las características del fertilizante utilizado.

La obtención de máximos rendimientos con la cantidad mínima de fertilizantes puede considerarse como la regla de oro de la fertilización. Fried y Broeshart⁴⁶ opinan que la cantidad de fertilizante está definida por la combinación de los factores siguientes, en la ecuación:

- $Q = f(s, p, n, i, e, m)c$ en donde:
 Q = cantidad de fertilizante a aplicar
 s = disponibilidad del nutrimento en el suelo
 p = requerimiento del nutrimento por la planta
 n = naturaleza o tipo del fertilizante
 i = interacción del fertilizante en el suelo
 e = época de aplicación
 m = método de aplicación
 c = costo de aplicación

La eficiencia de la fertilización

Se denomina eficiencia de la fertilización a la proporción —expresada en porcentaje— utilizada por la planta de la cantidad de fertilizante aplicada (Guerrero^{51, 52}). La utilización por la planta del nutrimento aplicado en el fertilizante, depende de su interacción con factores climáticos y edáficos, originando procesos que conducen a pérdidas por lixiviación, volatilización, fijación e inmovilización.

El aumento de la eficiencia de la fertilización se puede lograr: utilizando mejores técnicas de aplicación de los fertilizantes, seleccionando fuentes adecuadas, aplicando en el momento y la secuencia más apropiados a la especie, introduciendo prácticas de manejo del suelo.

Por ser el fósforo un elemento con alto grado de fijación en suelos tropicales, se anotan a continuación su capacidad de fijación y su eficiencia en la fertilización, para diferentes tipos de suelos tropicales, según Guerrero^{51, 52}:

Suelos	Capacidad de fijación de P (%)	Eficiencia de la fertilización fosfatada (%)
Oxisoles	80 - 90	10 - 20
Ultisoles	70 - 90	10 - 30
Andosoles	90 - 95	5 - 10
Aluviales	70 - 80	20 - 30

La eficiencia de la fertilización depende mucho de la selección de la fuente del fertilizante. El Cuadro 74 relaciona fuentes de N, P, K y boro y las condiciones de su uso como fertilizantes.

CUADRO 74: Fuentes de nitrógeno, fósforo, potasio y boro y sus condiciones de uso como fertilizante.

Fuente	Fórmula	Contenido N %	Condiciones de uso en relación con la eficiencia de la fertilización
Urea	$\text{Co}(\text{NH}_2)_2$	46	En el suelo hidroliza, formando NH_4 y luego este catión se oxida para formar NO_3 , dejando un residuo ácido. Puede ser poco eficiente en suelos con débil nitrificación. En suelos con pH 7,0 las aplicaciones superficiales pueden generar pérdidas acentuadas de N por volatilización. Es 100% soluble.
Sulfato de Amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	20% N 24% S	Al llegar al suelo libera NH_4 , el cual puede formar NO_3 o ser retenido por las micelas, por lo cual tiene buena persistencia en el suelo. Es buena fuente de S. Acidifica el suelo y cuando su uso es continuado habrá necesidad de encalar. En suelos de baja CIC de regiones lluviosas puede causar una desbasificación.
Nitrón-26	NH_4NO_3	26	Provee las dos formas de N, NO_3 y NH_4 , de rápida y lenta aprovechabilidad, respectivamente, lo cual puede constituir una ventaja. Es muy higroscópico y por ello su aplicación debe ser inmediata a la apertura de los empaques. Con aceites forma una mezcla explosiva. Tiene reacción ácida.
Nitrato de Sodio	NaNO_3	16	Debido a que el portador es NO_3 , el cual es fácilmente lixiviado, su persistencia en el suelo es precaria, lo cual determina una muy baja eficiencia en suelos livianos de regiones lluviosas. No es acidificante. El N presente es fácilmente absorbido por las plantas.

Continuación Cuadro 74.

Fuente	Fórmula	Contenido N %	Condiciones de uso en relación con la eficiencia de la fertilización
Superfosfato Triple	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	P_2O_5 (%) 46 14% Ca	Prácticamente, la totalidad (95-98%) de su P es soluble en agua. Normalmente es granulado. En suelos altamente fijadores de P (Oxisoles, Andosoles, Ultisoles) debe aplicarse en forma localizada el producto granulado. Su aplicación en polvo ofrece una eficiencia mínima. En suelos muy ácidos, incluyendo Andosoles, el encalado moderado puede aumentar su eficiencia.
Superfosfato Simple	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ CaSO_4	22 10% S 20% Ca	Sus condiciones de uso son iguales al superfosfato triple, excepto que su contenido de S la califica como fuente indicada para suelos deficientes en P y S. Como desventaja se puede anotar su bajo contenido de P, en comparación al superfosfato triple.
Fosfato de Amonio (Mono)	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	48 11% N	Los fosfatos de amonio son 100% solubles en agua, por lo cual deben observarse las mismas normas de uso que para los superfosfatos en suelos altamente fijadores del P. Provee N y P, cuya interacción es muy importante en cultivos tropicales. Fuente muy apropiada para suelos no deficientes en K.
Escorias Thomas Calfos	Fosfocilicatos de Calcio	14 32% Ca	Su solubilidad en agua es nula o muy baja, lo que hace que su aprovechamiento por la planta sea lento. Fuente eficiente en suelos con pH menor de 5.5 y altamente fijadores de P. Su aplicación debe hacerse mezclando bien el producto con el suelo, 15-30 días antes de la siembra. Alto poder residual. Muy útil para pastos, cultivos de ciclo largo y perennes.
Roca Fosfórica	Apatitas	22	En razón de su muy baja solubilidad en agua y en citrato, su aprovechamiento por los cultivos de ciclo corto es nulo. Su uso es factible en suelos con pH menor de 5.0 para cultivos de ciclo largo, perenne o pastos, cuando se aplica finamente y bien mezclada con el suelo. Su uso en fabricación de "compost" puede incrementar la aprovechabilidad del P.
Cloruro de Potasio	K_2O	K_2O (%) 60	Es el más comúnmente usado. Su solubilidad es del 100%. Conviene a todos los suelos y a la mayoría de los cultivos, excepto a aquellos que son sensibles al cloro.
Sulfato de Potasio	K_2SO_4		Es 100% soluble en agua. Conviene para suelos deficientes en S. Se debe usar para cultivos sensibles al cloro.
Borax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	B (%) 36.5 52.5 ^a	La máxima disponibilidad se consigue a un pH inferior a 6 y superior a 4.5; no debe encalarse simultáneamente; particularmente apropiado en Andosoles y suelos de Diabasa, se lava fácilmente y se aconseja su aplicación secuencial, según análisis foliar; resultados sorprendentes con <i>eucalyptus</i> y pinos tropicales.
Borato fertilizante		48 68	

FUENTE: Adaptado de Guerrero^{51,52}.

Efectos secundarios de la fertilización

La fertilización puede considerarse como un tratamiento cultural energético que involucra procesos complejos y dinámicos dentro del ecosistema. Mientras que el resultado principal de la aplicación de fertilizantes es el aumento de la producción de madera, su función primaria es el aumento de la eficiencia fotosintética, como resultado de la corrección en el nivel de un nutriente involucrado en la síntesis de clorofila (Prittchet⁹³). Estrechamente relacionados con los efectos primarios de la fertilización, están los efectos secundarios resultantes. Dado que las especies difieren en sus requerimientos nutricionales y en su capacidad para extraer nutrientes del suelo, los fertilizantes pueden afectar el balance entre las especies en plantaciones mixtas y la supervivencia y vigor de la vegetación menor. Los cambios en la concentración de nutrientes y en las condiciones fisiológicas de la planta, pueden afectar los hábitos alimenticios de animales que se nutren de hojas y cortezas y la susceptibilidad al ataque de insectos (Baule y Fricker¹⁰). Otro efecto importante de la fertilización radica en el aumento de la acidez del suelo, como ocurre con los fertilizantes nitrogenados.

Esta circunstancia influye en la cantidad de bacterias y hongos del suelo. Prittchet⁹³ comenta que la aplicación de fertilizantes puede aumentar o disminuir la efectividad de la micorriza, dependiendo de las condiciones del suelo. Otros efectos son igualmente señalados por el mismo autor, como la disminución de la napa freática en sitios húmedos y un mayor consumo de agua en períodos secos. Concluye que los efectos secundarios de la fertilización sobre las propiedades del suelo pueden ser positivos o negativos, según las condiciones del sitio.

Algunos ejemplos para el trópico

La literatura sobre ensayos de fertilización forestal en el trópico se encuentra dispersa y, en América Tropical, es muy reciente. En el peor de los casos, los resultados de los ensayos no han sido publicados o sólo se difundieron en forma restringida. A manera de ejemplo, se reseñan algunos casos exitosos de aplicación de fertilizantes en plantaciones forestales, los cuales pueden ser útiles al lector. El Cuadro 75 resume tales resultados.

Cuadro 75: Resultados de algunos ensayos de fertilización de plantaciones forestales en el trópico.

Autor	País y Sitio	Especie	Fertilizante	Dosis aplicada	Efectos sobresalientes
Waring ¹³⁸	Australia	<i>P. radiata</i>	Roca fosf.	373 kg/ha	Incremento en altura de 0.69 m entre el 1o. y 2o. turno (20 años)
Waring ¹³⁸	Australia	<i>P. radiata</i>	Urea y fosfato dicálcico	499 kg/ha 188 kg/ha	Aumentos de 146 cm (altura), 1.59 cm (diámetro), 10 cm ² (área basal) con aplicación de P solamente. Aumentos de 300 cm (altura), 369 cm (diámetro), 29.55 cm ² (área basal) por la interacción N x P en <i>P. radiata</i> de 5 años.
Schulz ¹¹²	Nueva Zelandia	<i>P. radiata</i>	N Y Mg	220 kg N/ha 62 kg Mg/ha	Volumen alcanzó 45 m ³ /ha en 4 años
Schulz ¹¹²	Nueva Zelandia	<i>P. radiata</i>	Superfosfato	208 kg P/ha	Incremento en área basal, en 11 años, de 44,7 m ² /ha contra 4.52 m ² /ha del testigo.
Zahner (en Schulz ¹¹²)	U.S.A.	<i>P. taeda</i>	N	336 kg/ha	Aumento del 25% en diámetro al 2o. año en plantaciones de 4-8 años.
Jackson, ¹¹² (en Schulz ¹¹²)	África (Costa de Marfil)	<i>P. caribaea</i>	N P K	100 g NPK/árbol	Incremento en 50% en altura a los dos años de edad.
Canon, P. ¹⁵	Colombia (Cauca) Andosoles	<i>C. lusitánica</i>	Bórax y NPK (10:30:10)	2.5 g Bórax/árbol + 50 g NPK/árbol	Se observó un aumento del 20% en altura después de 1 año.
Dyson ³⁰	Panamá Oxisoles	<i>P. caribaea</i>	Roca fosfórica	340 g/árbol	Aumento volumétrico de 45 m ³ /ha y 5.4 m ³ /ha y 5.4 m ³ /ha/año en plantaciones de 8 años.
Procter ⁹⁴	África Tanzania	<i>P. radiata</i> <i>P. patula</i>	Bórax	8 g Bórax/árbol	El mejor crecimiento en suelos con 16 ppm de boro
Germishuisen (en Wormald ¹⁴⁵)	África Swazilandia)	<i>P. patula</i>	N, P, KCl, B.S.	33.9 g N/árbol + 21.4 g P/árbol + 28.5 g K/árbol	Incremento en altura de 125 cm entre 18 y 30 meses de edad. Efecto del fertilizante fue casi el doble en el 2o. año.

MANEJO DE PLANTACIONES Y PRODUCTIVIDAD DEL SUELO

El aprovechamiento del bosque y el *status* nutricional del sitio

El manejo silvicultural de las plantaciones forestales presenta ventajas, en comparación con los bosques naturales, debido a que la actividad biológica del suelo se puede activar a través de los raleos y especialmente de la tala rasa. En cambio, dentro del bosque natural, las condiciones de temperatura e insolación casi no cambian, por lo que las condiciones biológicas permanecen lejos del nivel óptimo (von Christen^{19, 20, 21}).

En Alemania, la manipulación del estado biológico del humus bruto, sólo a través de medidas silviculturales, a menudo no es exitoso, porque las condiciones del suelo son muy desfavorables. En tales casos, se necesita la aplicación de cal y/o fertilizantes. En el pasado, se aplicaron grandes cantidades de cal (1-3 ton/ha), para bajar la alta acidez del humus (pH entre 3 y 4), pero resultados recientes han demostrado que esta forma de provocar la descomposición conduce a una mineralización fuerte, mas de poca duración, con pérdidas apreciables de nutrimentos, especialmente de nitrógeno. Además no acelera la descomposición de las hojas caídas después del encalamiento (Ulrich¹²⁹, citado por von Christen^{19, 20, 21}).

Para mantener una alta productividad del suelo bajo plantaciones forestales es necesario tener en cuenta que la fertilización no es el único medio para tal fin; los tratamientos silviculturales (limpiezas, selección de especies, preparación del suelo, raleos) son la base esencial para mejorar la producción maderera de un sitio. La restitución de los elementos nutritivos removidos, a través del aprovechamiento del rodal, debe ser también objetivo de una sana silvicultura.

Existen muy pocos ejemplos en el trópico que cuantifiquen la magnitud de las pérdidas de nutrimentos del sitio por las operaciones de aprovechamiento de la madera. El Cuadro 67 da cuenta de la remoción de los principales bioelementos (N, P, K, Ca, Mg), debida a las operaciones silviculturales (raleos y corta total) de rodales de *Pinus patula* y *Cupressus lusitanica* en Tanzania. Lundgren⁸⁰ concluye, para esta investigación, que el potasio logró compensar el fuerte descenso que sufrió durante la rotación (30 años), gracias a una demanda anual baja del *P. patula* (78 kg/ha) y del *C. lusitanica* (74 Kg/ha), mientras que el fósforo se comportó, con sus bajos niveles (15-20 kg/ha) y una demanda anual de 13 Kg/ha, como un factor limitativo

del crecimiento. Los inventarios totales de Ca y Mg en el suelo, en cambio, son muy altos en relación con la demanda anual de las dos especies forestales mencionadas.

El Cuadro 76 arroja datos interesantes de los efectos de las entresacas sobre las tasas de transferencia de nitrógeno, en una plantación de teca (*Tectona grandis*) de 25 años, en Nigeria. Se aprecia claramente que: a) la demanda anual promedio obviamente disminuyó en los dos tratamientos (entresaca moderada y fuerte) en 8 y 24%, respectivamente; b) la tasa de transferencia dentro del árbol (N en el follaje — N en el *litter*) disminuyó en 50 y 70%, con respecto al control en los dos tratamientos mencionados; c) la transferencia al suelo mineral (descomposición-demanda) fue negativa para el control y la entresaca moderada y ligeramente positiva (+ 2.4 kg/ha/año) para la entresaca fuerte. Los resultados anteriores permiten concluir que el tratamiento silvicultural de la plantación con una entresaca fuerte, no sólo disminuyó la demanda de nitrógeno sobre el sitio, sino que equilibró la reserva.

CUADRO 76: Efectos de la entresaca sobre las tasas de transferencia de N en una plantación de teca de 25 años en Nigeria.

	Control	Entresaca	
		Moderada	Fuerte
Demanda de N (Kg/ha)			
Tronco	515.5	413.4	403.0
Corteza	152.6	187.0	91.2
Ramas	202.4	228.1	95.9
Hojas	79.2	72.5	62.9
Total	951.7	1101.0	652.9
Demanda anual promedio	114.4	105.6	86.5
Transferencia dentro del árbol (Kg/ha/año)			
Follaje	79.2	72.5	62.9
Litter	49.4	57.1	53.7
Translocación	30.0	15.4	9.2
Transferencia al piso			
Litter	49.4	57.1	53.7
Lluvia	—	—	—
Transferencia al suelo mineral			
Descomposición (retorno)	81.5	84.1	88.9
Retorno - demanda	-33	21.5	+ 2.4

FUENTE: Nwoboshi⁸⁷.

Una serie de estudios se han realizado en las zonas templada y subtropical para determinar los efectos de los diferentes sistemas de

cosecha —introduciendo variaciones en los grados de utilización del árbol— sobre la remoción de nutrimentos. Will¹⁴³ comenta que el aprovechamiento de todo el árbol de un rodal de pino radiata de 26 años, en Nueva Zelandia, superó en casi dos veces la tasa de agotamiento de nutrimentos experimentada por la cosecha del tronco y la corteza solamente.

El manejo en la fase de tumba y extracción es muy importante para la dinámica del suelo. En América Tropical, con excepción quizás de Brasil, no se han investigado técnicas de manejo, debido a que existen pocas regiones con plantaciones forestales que hayan alcanzado la edad de primera rotación y se hayan aprovechado y replantado. Lundgren⁸⁰ menciona las siguientes prácticas, como relevantes del grado de disturbio del suelo:

- tipo de técnica y maquinaria usada en la corta y extracción;
- grado de biomasa removida;
- cantidad de residuos y hojarasca removida (quemada o removida de otro modo);
- longitud del período de exposición de la superficie del suelo (el tiempo desde la corta hasta el cierre del dosel de la segunda rotación);
- preparación del suelo antes de plantar.

Las entresacas controladas y a tiempo tienen un efecto benéfico sobre el suelo, si se tiene en cuenta que los rodales maduros generalmente están caracterizados por:

- una ausencia más o menos completa de vegetación rastrera;
- una baja actividad de descomponedores de la hojarasca, con la consecuente formación de capas de humus (humus bruto, moder); por consiguiente, una enorme inmovilización de nutrimentos;
- una demanda rápida y continuada de nutrimentos disponibles del suelo superior;
- una disminución en la materia orgánica;
- un descenso en la porosidad, debido probablemente a una baja actividad biológica;
- un descenso en el nivel de nutrimentos del suelo, entendido como ganancia para la planta;

Una reducción en la capacidad de retención de nutrimentos, causada probablemente por un descenso en la materia orgánica. En el trópico húmedo, este "lavado" juega un papel importante en zonas de alta precipitación.

Se acepta generalmente que los aspectos cuantitativos de los procesos biológicos, químicos y físicos en el suelo no están suficientemente conocidos como para predecir el efecto, a largo plazo, del aprovechamiento intensivo sobre el suelo o la productividad forestal. La fertilidad del suelo y la productividad del sitio pueden ser manejadas utilizando técnicas de fertilización y ajustes en los períodos de rotación. Además, la intensidad del aprovechamiento del rodal puede acondicionarse a los objetivos de producción, dentro de las limitaciones nutricionales del ecosistema. Wells y Jorgensen¹⁴⁰ opinan que el suministro de nutrimentos del suelo y la productividad cambian relativamente despacio en las plantaciones; por consiguiente, las prácticas de cosecha pueden seleccionarse para cada rotación, sin serios riesgos de descenso en la productividad del suelo. Por otro lado, Stone¹²⁴ expresa serios reparos a la interpretación de los resultados de análisis de suelos, cuando se utilizan para justificar reducciones en la productividad de las plantaciones; menciona que este aspecto ha sido objeto de mucha especulación antes que de juiciosa interpretación. Opina, además, que el problema de las consecuencias de la práctica del aprovechamiento intensivo no estimula experimentos de largo plazo, sino que se debe utilizar la información existente y aprovechar oportunidades para una investigación relevante a corto plazo.

Preparación y manejo del suelo

Las medidas de preparación y manejo del suelo han probado ser, en varios países tropicales, un método eficaz en el establecimiento de plantaciones forestales. Además ahorran costos de manejo (limpiezas, matamalezas, fertilización, entre otros). Los objetivos principales de la preparación del suelo pueden resumirse así:

- a. remover la maleza del sitio de plantación;
- b. crear condiciones que capaciten al suelo para absorber la mayor cantidad de agua de lluvia posible. La escorrentía superficial debe reducirse al mínimo, con el objeto de aumentar la reserva de humedad del suelo;
- c. proveer buenas condiciones de enraizamiento para los árboles y un volumen radical de suelo tan amplio como sea

posible. Los horizontes de plintita endurecida, *hard pans*, horizontes cementados o cualquier otro impedimento cerca de la superficie deben ser destruidos;

- d. crear condiciones propicias para labores mecanizables y de mantenimiento después de la plantación;
- e. eliminar el peligro de incendio o minimizarlo.

Las principales medidas de preparación del suelo incluyen: fertilización, abonadura verde, quema controlada, *mulching*, cero labranza, labranza mínima, arada profunda, rastrillado, ahoyado, encalado, riego, subsolado y aplicación de herbicidas. Estos métodos han producido en la mayoría de los casos óptimos crecimientos y mayor retorno financiero. En las plantaciones de pinos y eucaliptos de Africa del Sur, se han ensayado con éxito desde 1977 la arada profunda y la rastrillada, complementadas con apertura de huecos de 50 cm de diámetro y la aspersion con el herbicida *glyphosate (round-up)*, a lo largo de las líneas de plantación, antes de plantar; esta labor va acompañada de fertilización (von Christen *et al*²³). En Suriname se plantan pinos, eucaliptos y *cordia alliodora* sobre camellones, aprovechando la ceniza y la broza del monte después de quemado. En Venezuela y los demás países tropicales americanos, la plantación en terrenos previamente arados se ha convertido en práctica común.

Para suelos ácidos de la tierra baja tropical (Ultisoles, Oxisoles), se han experimentado con éxito en la agricultura (y parcialmente en la reforestación) las siguientes prácticas de manejo (Sánchez¹⁰⁶; Villachica¹³⁴):

- manejo de la acidez del suelo;
- manejo de los bajos contenidos de fósforo y su fijación;
- tasas y métodos de aplicación de fósforo;
- manejo de otras deficiencias nutricionales;
- manejo de sequías periódicas.

RESUMEN

1. Se discute el *status* nutricional del suelo bajo bosque natural con base en las características químicas de algunos suelos de América Tropical.

2. La composición florística del bosque no guarda una correlación clara con las características edáficas. Se destaca el hecho de que un número alto de especies se encuentra únicamente en suelos de escasa fertilidad, mientras que suelos fértiles sostienen a menudo bosques de pocas especies. Se hace, además, un breve análisis de la regeneración natural del bosque primario.
3. Los factores principales que califican la productividad del suelo son: retención de humedad, *status* nutricional y aireación.
4. Los cambios en el suelo bajo monocultivos forestales se suceden en las capas superiores y se relacionan con el suministro de materia orgánica, la capacidad de infiltración, la retención de humedad del suelo, la estructura y la inmovilización apreciable de nutrimentos, junto con variaciones del pH y del contenido de nitrógeno.
5. La mayor parte de las alteraciones físicas del suelo se manifiestan en la compactación de su superficie (5-10 cm). Otros cambios físicos han sido: escasez de materia orgánica, déficit de agua, erosión, aumento o disminución de la densidad aparente.
6. Los cambios en las propiedades químicas del suelo están asociados con: suministro y descomposición de la materia orgánica, reservas de nutrimentos (fuerte inmovilización de Ca, Mg y K), pH y nivel de nitrógeno.
7. Los factores biológicos de cierta significación en la productividad de plantaciones forestales son los organismos de la rizosfera y la micorriza.
8. Los factores climáticos (especialmente lluvia) juegan un papel primordial en el desarrollo de plantaciones forestales.
9. El aporte de hojarasca (ganancia), la inmovilización y remoción de nutrimentos (pérdida) constituyen el balance nutricional del bosque y deben considerarse como datos valiosos para la planificación de programas de fertilización.
10. Los factores limitativos para la reforestación en suelos de ladera son la retención de humedad del suelo, la profundidad efectiva y el nivel de nutrimentos, entre los principales.

11. Los factores de sitio en la productividad de plantaciones forestales están asociados entre sí y es difícil evaluarlos en su totalidad. El método más conocido para medir la productividad de un sitio forestal es el del **índice de sitio**.
12. Los factores edáficos que influyen la productividad pueden expresarse como índices. Tales índices son, por ejemplo: pF, pH, índice de textura, relaciones C-P y C-N.
13. La práctica de nutrición forestal es importante en los trópicos americanos, debido a que se obtienen mayores rendimientos de madera en suelos generalmente deficientes en nitrógeno, fósforo y boro (principalmente en suelos Andosoles y derivados de Diabasa). Existen a menudo suelos tropicales deficitarios en casi todos los elementos nutritivos.
14. Los 16 elementos nutritivos esenciales para la planta se encuentran en el suelo, dentro de ámbitos muy amplios. Corresponde al investigador identificar los nutrimentos deficitarios y aplicar los correctivos necesarios, según el suelo y la especie forestal.
15. La aplicación de fertilizantes debe tener en cuenta las características climáticas y edáficas, la naturaleza y propiedades de las plantas, sus exigencias de nutrimentos, su sistema radical, el manejo del suelo, el tipo de producción y las características del fertilizante utilizado.
16. En el trópico se han reportado ensayos de fertilización con resultados exitosos. Los fertilizantes más frecuentemente usados han sido combinaciones de N, P y K y, en otros casos, borax, superfosfato, roca fosfórica y urea.
17. El mantenimiento de la productividad del suelo bajo plantaciones forestales se logra (además de la fertilización) por el manejo adecuado de las mismas (tratamientos silviculturales). La restitución de los elementos nutritivos, removidos a través del aprovechamiento del rodal, debe ser objeto de una sana silvicultura.
18. Los objetivos principales de la preparación del suelo son: a) remover la maleza del sitio de plantación; b) crear condiciones para la máxima absorción de agua de lluvia; c) proveer buenas condiciones de enraizamiento; d) crear condiciones favorables a la mecanización; e) eliminar el peligro de incendio o minimizarlo.

BIBLIOGRAFIA

1. AHN, P. 1960. The mapping, classification and interpretation of Ghana forest soils for forestry purposes. In Fifth World Forestry Congress, Seattle. University of Washington, V.1, p. 508-517.
2. ALEXANDER, E.B. 1973. A comparison of forest and savanna soils in Northeastern Nicaragua. *Turrialba* 23(2):181-191.
3. ALONSO, M.C. 1967. Estudio de la regeneración natural en zonas explotadas de los bosques pantanosos de la Costa Sur del Pacífico de Colombia. Tesis MSC. Turrialba, Costa Rica, IICA. 81 p.
4. ASHTON, P.S. 1964. Ecological studies in the mixed Dipterocarp forest of Brunei state. Oxford. For. Mem, 25 p.
5. _____ ; BRUNIG, E.F. 1975. The variation of tropical moist forest in relation to environmental factors and its relevance to land-use planning. In *Tropical Moist Forest. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für forst - und Holzwirtschaft*. No. 109. Reinbek, Hamburg, p. 59-86.
6. BALLARD, R. 1977. Predicting fertilizer requirements of production forests. In *Use of fertilizers in New Zealand Forestry. Symposium No. 19*. F.R.I. Forestry Service.
7. BARNETT, A.P. *et al.* s.f. Soil erodibility in relation to soil and site properties. Georgia. Inst. of Radiation Ecology, p. 83-91.
8. BARTHOLOMEW, W.V. 1972. El nitrógeno del suelo; procesos de abastecimiento y rendimiento de los cultivos. Interna-

- tional soil fertility evaluation and improvement program. Boletín Técnico No. 6. Universidad de Carolina del Norte. 97 p.
9. _____. 1977. Soil nitrogen in the tropics. In Sánchez, P. (ed.). A review of soils research in tropical Latin America. Tech. Bull. No. 219. North Carolina Agr. Exp. St. and U.S. Ag. for Int. Devel., p. 68-76.
 10. BAULE, H.; FRICKER, C. 1970. The fertilizer treatment of forest trees. Munchen B.L.V.W. Germany, 250 p.
 11. BLASCO, L.M. 1974. El fósforo orgánico y su metabolismo en los suelos. Suelos Ecuatoriales 6(1):19-43.
 12. BRUCE; SCHUMACHER. 1965. Medición Forestal. México. Herrero, 474 p.
 13. BRUNIG, E.F. 1968. Der heidewald von Sarawak und Brune; Mitti. d. Bundersforschungsanstalt f'F. und Holzw. Reinbek. No. 68. 151 p.
 14. CAMPBELL, V.; ARAUJO, D. 1974. Trabalhos silviculturais. Informe de Brasil. In Reunión internacional sobre silvicultura de bosques tropicales. OEA-IICA-INDERENA-CONI. Informe de conferencias, cursos y reuniones No. 61. Cali, Colombia. IIA 1-IIA 15.
 15. CANON, P. 1980. Efecto de la aplicación de diferentes niveles de Borax y N.P.K. (10-30-10) en el crecimiento de *Cupressus lusitanica* al año de su establecimiento. Cartón de Colombia. Informe de investigación No. 55. 5 p. (mimeo).
 16. CHAFFEY, D.R. 1973. Decline in productivity under successive rotations of forest monoculture. Land Res. Div., ODA (mimeo).
 17. CHIJOKE, O.E. 1980. Impact on soils of fast-growing species in lowland humid tropics. FAO forestry paper 21. Rome. 111 p.

18. CHRISTEN, H. VON. 1972. Informe final al gobierno alemán sobre el programa de silvicultura del Proyecto Carare-Opón (manuscrito en alemán, no publicado).
19. _____. 1976. Clasificación preliminar y evaluación de los sitios de la tierra baja húmeda de Colombia para el manejo forestal, con especial consideración de los suelos hidromórficos. Enfoques Colombianos, temas latinoamericanos, Monografía No. 8, Suelos del Trópico —Bogotá— Fundación Friedrich Naumann, p. 9-103.
20. _____. 1978. Aspectos edafológicos sobre el manejo de las plantaciones de coníferas en las cordilleras colombianas. 32 p. (manuscrito no publicado).
21. _____. 1980. La deficiencia de fósforo y nitrógeno en suelos forestales y experiencias para su corrección. Bogotá, CONIF. 40 p. (mimeo.).
22. _____ ; SALAS, G. DE LAS. 1978. Apuntes de un viaje de observación de trabajos de silvicultura en el bosque mesofítico de Suriname. Bogotá. Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal. 32 p. (mimeo.).
23. _____ *et al.* 1981. Informe de viaje a Sur Africa y Brasil. Bogotá. Compañía Nacional de Reforestación. 6 p. (mimeo.).
24. CORNFORTH, O. 1970. Reforestation and nutrient reserves in the humid tropics. *J. of. Appl. Ecology* 7(3):609-15.
25. CORTES, A. *et al.* 1973. Génesis, clasificación y aptitud de explotación de algunos suelos de la Orinoquía y la Amazonía colombiana. Universidad Jorge Tadeo Lozano y Coiciencias. 185 p.
26. COY, A. 1946. Influencia del boro en el crecimiento de coníferas. *Ecología; suelos del trópico*. Monografías No. 8. Bogotá. Edit. Guadalupe, p. 107-123.
27. _____. 1981. Fertilización forestal en los trópicos, con énfasis en eucaliptos y coníferas. Bogotá, Agroforest Ltda. 213 p.

28. DUBOIS, J. 1971. Silvicultural research in the Amazon. FU: SF/BRA 4. Tech. Report. 3. Rome. FAO. 192 p.
29. _____. 1967. Floresta amazônica e sua utilização face aos principios modernos de conservação da natureza. In Simposio sobre biota Amazônica. Conservação da natureza e recursos naturais V7:115-146.
30. DYSON, W. 1981. Fertilización de plantaciones forestales en la reserva forestal La Yeguada, Panamá. Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Serie Técnica. Informe técnico No. 18. 14 p.
31. EGUNJUBI, J.K.; BADA, S.O. 1979. Biomass and nutrient distribution in stands of *Pinus Caribaea* L. in dry forest zone of Nigeria. Biotropica 11(2):130-135.
32. EWEL, J. 1981. Secondary forests: the tropical wood resource of the future. In M. Chavarría (ed.). Simposio internacional sobre las Ciencias Forestales y su contribución al desarrollo de la América tropical. San José, Costa Rica, p. 53-61.
33. FASSBENDER, W.L. 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, Costa Rica. IICA, p. 4.1-4.10.
34. _____. 1975. Química de suelos; con énfasis en suelos de América Latina. Turrialba. IICA. Serie de Libros y Materiales Educativos No. 24. 271 p.
35. _____ *et al.* 1977. Estudios edafológicos en las plantaciones de *Pinus caribaea* en el Oriente de Venezuela I: Requerimientos hidrológicos. s.n.t. 17 p. (mimeo).
36. _____ ; 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. 24(2):141-149.
37. FINOL, H. 1975. La silvicultura en la Orinoquía Venezolana. Revista Forestal Venezolana 25:37-112.

38. _____. 1981. Planificación silvicultural de los bosques ricos en planta manaca (*Euterpe oleracea*) en el delta del río Orinoco. Universidad de los Andes. Instituto de Silvicultura, Mérida, Venezuela. 116 p.
39. FLORES, P.S.; ALVARADO A.; BORNEMISZA, E. 1978. Caracterización y clasificación de algunos suelos del bosque amazónico peruano de Iquitos. Turrialba 28(2):99-103.
40. FOELSTER, H.; SALAS, G. DE LAS. 1974. Wasser als Minimum factor in regenwald. Mittl. d. Deutsch. Bodenk. Gesell. 20:233-238.
41. _____. ; CHRISTEN, H. VON. 1977. The influence of quaternary uplift on the altitude zonation on mountain soils on diabase and volcanic ash in humid parts of the Colombian Andes. Catena (2):33-63.
42. _____. ; FASSBENDER, H.W. 1978. Ockopedologische grundlagen der bodennutzung in den tropen und subtropen. Vorlesungsmanuskript. Forstl. Fakultat. Univ. Göttingen. 153 p.
43. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. 1974. Savanna forestry research station, Nigeria; silviculture and mensuration. Roma. SF/NIR 16. Technical report No. 7.
44. FORSYTHE, W. 1970. Las propiedades y condiciones físicas del suelo; la productividad y el manejo, s.n.t. 12 p. (mimeo).
45. FRANCO, W. 1979. Die wasserdynamik einiger waldstandorte der West-Llanos Venezuelas und ihre beziehung sur saisonalitat des laubfalls. Göttingen Bodenk. Berichte 61:1-201.
46. FRIED, M.; BROESHART. 1967. The soil-plant system in relation to inorganic nutrition. New York. Academic Press. 358 p.
47. GARAVITO, N.F.; LEON, S. 1978. Propiedades del suelo en relación con las deficiencias de boro en el Valle del Cauca. Suelos Ecuatoriales 1 x (2):195-201.

48. GIRALDO, L.G.; VALLE, J.I. DEL. 1980. El crecimiento de *Cordia alliodora* (Ruiz & Pavon) Oken en relación con algunos factores climáticos, edáficos y fisiográficos en el Suroeste de Antioquía, Colombia. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín. 23(1):21-23.
49. GOODLAND, R.; POLLARD, R. 1973. The Brazilian cerrado vegetation: a fertility gradient. J. Ecol. 61:219-224.
50. GRAVES, A. 1974. A preliminary examination of global site assessment principles. C.F.I. Univ. of Oxford. 11 p. (mimeo).
51. GUERRERO, R.R. 1974. Formas de fósforo y sus relaciones con la fertilidad de los suelos. Suelos Ecuatoriales 6(1):349-388.
52. _____. 1980. La recomendación de fertilizantes; fundamentos y aplicaciones. In Silva, M.F. (ed.). Fertilidad de suelos; diagnóstico y control. Soc. Col. de la Ciencia del Suelo. Bogotá. Imprimir Ltda., p. 225-269.
53. GUPTA, U.C. 1977. Effects of boron and limestone on cereal yields and on B and N concentration of plant tissue. Plant and Soil. 47(1):283-287.
54. HAMILTON, C.D. 1975. Changes in the soil under *Pinus radiata*. Aust. For (29):275-89.
55. HARDY, E. 1970. Soils and natural vegetation in Trinidad, W.I. Biotrópica 10:70-71.
56. HASE, H. 1981. Naehrstoff reserven auf banco - standorten der waldreserve Caparo, Venezuela unter besonderer berücksichtigung der plantangenwirtschafft mit teak (*Tectona grandis*). Dissertation. Univ. Göttingen.
57. _____ ; FOELSTER, H. 1980. Nutrient uptake and production potential of teak (*Tectona grandis*) plantations on alluvial sandy loams in the Western Llanos of Venezuela. In Reunión plantaciones de rápido crecimiento en el neotrópico. IUFRO S1.07-09. Río Piedras, Puerto Rico. Sept. 8-12. 7 p.

58. HETSCH, W. 1976. Die beziehung von niederschlag und bodenbildung in der Andenkordillere Venezuelas. Dissertation. Univ. Göttingen. 167 p.
59. _____ ; HOHEISEL, H. 1976. Standorts - und vegetationsgliederung in einem tropischen neberwald Alig. F. und Jagdz. 147:400-209.
60. HILLS, G.A.; PIERPOINT G. 1960. Forest site evaluation in Ontario. Ontario Dept. of lands and forests. Tech. Series. Research Report No. 42. 638 p.
61. HOLDRIDGE, L.R. 1978. Ecología basada en zonas de vida. Traducido del inglés por Humberto Jiménez. San José, Costa Rica. Editorial IICA. Serie Libros y Materiales Educativos No. 34. 216 p.
62. HUSTON, M. 1981. Los nutrimentos del suelo y la diversidad de especies de árboles en los bosques de Costa Rica. In Chavarría M. (editor). Simposio Internacional sobre las Ciencias Forestales y su contribución al desarrollo de América tropical. San José, Costa Rica. Editorial EUNED. 283 p.
63. JADAN, P.S. 1972. Sistema de clasificación de sitios para *Eucalyptus deglupta* Bl. en Turrialba, Costa Rica. Tesis MS. C. IICA. 98 p.
64. JEREZ, A.; HURTADO, G. 1975. Indice de sitio para *Eucalyptus globulus* en la Sabana de Bogotá y algunas consideraciones económicas sobre su rendimiento. Tesis Universidad Distrital "F.J.C.". Bogotá, 65 p.
65. JOHNSON, N.E. 1976. Biological opportunities and risks associated with fastgrowing plantations in the tropics. Journ. of Forestry 74(4):206-212.
66. JONES, H.E.; SCARSETH, G.D. 1944. The calcium-boron needs. Soil Science. 57:15-24.
67. JURADO, B.F. *et al.* 1980. Extração e exportação de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* heil ex-maiden em função da idade: 1. macronutrientes; 2. micronutrientes. IPEF. Piracicaba (20):1-23 y 27-45.

68. KAMPRATH, E.J. 1977. Phosphorus. In Sánchez, P.A. *et al* (eds.). A review of soils research in tropical Latin America. Tech. Bull. No. 219. North Carolina Agr. Exp. St. and U.S.Ag. for Int. Devel., p. 138-161.
69. KEOGH, R.M. 1980. Teak (*Tectona grandis* Linn.) provisional site classification chart for the Caribbean, Central America, Venezuela and Colombia. In Reunión plantaciones de rápido crecimiento en el neotrópico. IUFRO S1.07.09. Río Piedras, Puerto Rico. Sept. 8-12. 13 p.
70. KLINGE, H.; MEDINA, E.; HERRERA, R. 1977. Studies on the ecology of Amazon Caatinga forest in southern Venezuela I; general features. Acta Cient. Venezolana 28:270-276.
71. KREBS, J.E. 1984. Chemical characteristics of the surface soil of three forests in San Carlos, Costa Rica. Turrialba 24(4):382-386.
72. LAATSCH, W. 1963. La economía del nitrógeno en los suelos forestales de coníferas del Sur de Alemania. Madrid. Anales de Edafología y Agrobiología. 22 p.
73. LAMB, A.F.A. 1968. Fast-growing timber trees of the lowland tropics No. 1: *Gmelina arborea*. C.F.I. Univ. of Oxford. Dept. of Forestry.
74. _____. 1973. *Pinus caribaea*, Vol. 1. C.F.I. Tropical Forestry papers No. 6. University of Oxford. Dept. of Forestry. 254 p.
75. LEAF, A.L.; MADGWICK, H.A. 1960. Evaluation of chemical analysis of soils and plants as aids in intensive soil management. In World Forestry Congress. Seattle, Washington. Proceedings. University of Washington, p. 554-557.
76. LEMME, G. 1965. Efectos de las características del suelo sobre la localización de la vegetación en las zonas ecuatorial y tropical húmedas. In Tropical soils and vegetation: proceedings of the Abidjan Symposium. Traducción del francés de G. de las Salas. París, UNESCO, p. 25-37.

77. LOPES, A.S.; COX, F.R. 1977. A survey of the fertility status of surface soils under "cerrado" vegetation in Brazil. *Soil Sc. Soc. Amb. Jour.* 41(4):742-747.
78. _____. 1977. Cerrado vegetation in Brazil: an edaphic gradient. *Agronomy Journal.* 69:828-831.
79. LUNA, C.Z.; SUAREZ, S.V. 1978. El potasio en suelos derivados de cenizas volcánicas. In *Suelos Ecuatoriales.* 9(2):37-44.
80. LUNDGREN, B. 1973. Soil conditions and nutrient cycling under natural and plantation forest in Tanzanian highlands. Upsala. Swedish University of Agricultural Sciences. Dept. of Forest Soils. Reports in forest ecology and forest soils 31. 426 p.
81. MAZUERA, H.; LADRACH, W. 1979. Composición y crecimiento de la regeneración natural de cuatro a quince años de edad en la Concesión del Bajo Calima. Cartón de Colombia, Informe de Investigación No. 46.
82. MEDINA, H.O. (ed.). 1974. El fósforo en zonas tropicales; tercer coloquio sobre suelos. *Suelos Ecuatoriales* 6(1):422.
83. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y CRIA. 1974. Manejo de bosques en la reserva forestal de Guarapiche, Estado Monagas. Anexo al informe de Venezuela. In Reunión internacional sobre silvicultura de bosques tropicales. OEA-IICA-INDERENA-CONIF. Cali, Colombia. Informe de Conferencias, cursos y reuniones No. 61.
84. MORTVEDT, J.J. 1978. Occurrence of micronutrients in rocks, soils, plants and fertilizers. In *Suelos Ecuatoriales* 9(2):134-140.
85. NEYRA, R.M. 1979. El bosque de guandal y sus posibilidades de manejo silvicultural. Proyecto de investigación y desarrollo industrial forestal. COL/OO74. Puclic. No. 9. 41 p.
86. NYE, P.H. 1961. Organic matter and nutrient cycles under most tropical forest. *Plant and Soil* 13(4):333-346.

87. NWOBOSHI, L.C. 1980. Nitrogen cycling in a teak plantation ecosystem in Nigeria. In Rosswall, T. (ed.). Nitrogen cycling in West African ecosystem. SCOPE/MAB/IIA. IBADAN, Nigeria. 450 p.
88. OERLTLI, J.J.; GREGUREVIC, E. 1975. Effect of pH on the absorption of boron by excised barley roots. *Agronomy Journal*. 2:278-280.
89. PARKS, R.Q.; SHAW, B. 1942. Possible mechanism of boron fixation in soil. I: Chemical. *Soil Sci. Soc. Am. Proceedings* 6:219-223.
90. PETERSON, L.A.; NEWMAN, R.C. 1976. Influence of soil pH on the availability of added boron. *Soil Sc. Soc. Am. Jour.* 40(2);280-282.
91. POORE, M.E.D. 1968. Studies in the Malaysian rainforest. In *The forest triassic sediment in Jengka forest reserve* J. Ecol. 56:143-196.
92. PROYECTO RADARGRAMETRICO AMAZONAS. 1979. *La Amazonía Colombiana y sus recursos*. Instituto Geográfica "Agustín Codazzi", Ministerio de Defensa Nacional y Centro Interamericano de Fotointerpretación. Bogotá, Colombia. Italgaf. S.A. p. 93-323.
93. PRITCHETT, W.L. 1979. *Properties and management of forest soils*. New York. Wiley & Sons. 500 p.
94. PROCTER, J. 1967. A nutritional disorder of pine. *Commonwealth For. Rev.* 46(2):145-154.
95. RICHARDS, P.W. 1963. Soil conditions in some Bornean lowland plant communities. In *Symposium on ecological research in humid tropics vegetation*. Sarawak, Kuching, UNESCO, p. 198-204.
96. ————. 1965. The types of vegetation of the humid tropics in relation to the soil. In *Tropical soils and vegetation; proceedings of the Abidjan Symposium*. París, UNESCO, p. 15-20.

97. ROBINSON, J.B.D.; HOSEGOOD, A.H.; DYSON, W.G. 1966. Note on a preliminary study of the effects of an East African soft-wood crop, on the physical and chemical condition of a tropical soil. *Comm. For. Review* (45):359-365.
98. ROCHA, FILHO, J.V. DE C. *et al.* 1979. Influencia do boro no crescimento e na composição química do *Eucalyptus grandis*. *Brasil Florestal*. An. 9. No. 39. p. 29-33.
99. SALAS, G. DE LAS. 1974. Factores edáficos y climáticos en la clasificación de sitios forestales. *Bosques de Colombia* 1(2):15-30.
100. _____. 1979. Some consequences of forest felling on soils and nutrients in tropical environments. Symposium on impact on soils by intensive forest harvesting. Syracuse, New York. School of Forestry and Environmental Sciences. August 13-19.
101. _____ ; FRANCO, J.M. 1978. Influencia del factor edáfico en el crecimiento inicial del laurel (*Cordia alliodora*) (R. & Pav.). Oken en las terrazas del Río Mira, Nariño, Colombia. Bogotá. CONIF. 45 p.
102. _____ ; BONGCAM, E. 1981 Estudio detallado de los suelos y uso potencial de las fincas La Unión y La Gloria. Monte-rubio, Magdalena (Informe no publicado). 33 p.
103. _____ ; AGUDELO, J. 1970. Fotointerpretación forestal y estudio general de suelos de la región del río Tocamito, Río Sucio, Chocó. 64 p. (Informe no publicado).
104. _____. 1978. Muestreo de la regeneración natural en dos áreas de cuatro y seis años de edad en el bosque húmedo tropical del Bajo Calima. CONIF. 17 p. (Informe no publicado).
105. _____. 1978. El Ecosistema Forestal Carare-Opón. CONIF serie técnica No. 8. 87 p. Bogotá. Servigráficos.
106. SANCHEZ, P.A. 1977. Alternativas al sistema de agricultura migratoria en América Latina. CIAT. 30 p. y anexos.

107. _____ ; BUOL, S.W. 1974. Properties of some soils of the upper Amazon Basin of Perú. Soil Science Soc. Am. Proc. 38(1):117-121.
108. SARLIN, P. 1963. La pedologie forestière appliquée aux reboisements. Bois et Forêts des Tropiques 90:17-33.
109. _____. 1969. Repartition des espèces forestières de la Côte d'Ivoire. Bois et Forest des Tropiques 90:17-33.
110. SCHULTZ, J.P. 1967. La regeneración natural de la selva mesofítica de Suriname después de su aprovechamiento. Boletín IFLA 23:3-26. Mérida, Venezuela.
111. _____. 1960. Ecological studies on rain forest in Northern Suriname. Amsterdam. North Holland Publ. Col. 267 p.
112. _____. 1975. A review of fertilizer research on some of the more important conifers and eucalyptus planted in subtropical and tropical countries with special reference to South Africa. De wet For. Res. st. Bulletin No. 53. 89 p.
113. SCOTT, H.D.; BEASLY, S.D.; THOMPSON, L.F. 1975. Effect of lime on boron transport to and uptake by cotton. Soil Sc. Soc. Am. Proc. 39(6):1116-1121.
114. SEARL, W.E. 1968. Soil productivity rating and capability classification in Trinidad and Tobago. IV Conferencia regional sobre fertilización de suelos en América Latina. Bogotá, 9 p.
115. SEUBERT, C.E.; SANCHEZ, P.A.; VALVERDE, C. 1977. Effects of land clearing methods on soils properties of an ultisol and crop performance in the Amazon jungle of Peru. Tropical Agriculture (Trinidad) 54(4):307-321.
116. SILVA, M.F. (ed.). 1980. Fertilidad de suelos; diagnóstico y control. Soc. Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, Imprimir Ltda. 420 p.
117. SLAGER, S.; SCHULZ, J.P. 1969. A study of the suitability of some soils in northern Suriname for *Pinus caribaea* var.

- hondurensis*. Netherland Journal of Agricultural Science. 17:92-98.
118. SINGH, G.W. 1979. Nutrient availability indices and optimum nutrient element levels in soils for crops under agroforestry conditions. In Mongi, H.O. y Huxley, P.A., eds. Soils research in agroforestry: Proceedings of an expert consultation. Nairobi. March. ICRAF, p. 439-470.
119. _____. 1968. Nutrient status of forest soils in humid tropical regions of Western Ghana, Tropical Ecology 9(2):119-130.
120. SOCIEDAD COLOMBIANA DE LA CIENCIA DEL SUELO. 1972. El uso del nitrógeno en el trópico. Suelos ecuatoriales 4(1):424.
121. SOMBROEK, W.G. 1966. Amazon soils; a reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region. Wageningen. PUDOC. 292 p.
122. STARK, N. 1971. Nutrient distribution in some Amazonian soils. Tropical Ecology 12(1):24-50.
123. _____. 1970. The nutrient content of plants and soils from Brazil and Suriname. Biotropica. 2(1):51-60.
124. STONE, E.L. 1979. Nutrient removal by intensive harvest; some research gaps and opportunities. In Symposium on impact of intensive harvesting on forest nutrient cycling. Proceedings. New York. College of environmental science and forestry. School of Forestry. p. 366-387.
125. STORIE, R.E. 1970. Manual de evaluación de suelos. Traducido por Alonso Blackaller Valdés. México. UTEHA. 225 p.
126. SVENSON, B.H.; SODERLUND, R. (eds.). 1976. Nitrogen, phosphorus and sulphur global cycles. SCOPE Report 7. Ecol. Bull (Stockholm) 22:23-73.
127. TENNESSEE VALLEY AUTHORITY. 1968. Forest fertilization, theory and practice. Alabama, 299 p.

128. TSCHINKEL, H.M. 1972. Growth, site factors and nutritional status of *Cupressus lusitanica* plantations in the highlands of Colombia. Tesis doctoral. Alemania. Univ. Hamburgo. 165 p.
129. ULRICH, B. 1972. Ein standortliches entscheidungs modell für die planung der phosphatdüngung von Waldbeständen. Die Phosphorsäure. 29(2-3):220-236.
130. _____. 1977. Stoffhaushalt von waldoekosystemem: eine arbeits anleitung. Göttingen. Institut für Bodenkunde und Waldernahrung. 361 p.
131. VALLE, J.I. DEL 1977. Sistemas silviculturales en el trópico húmedo. In El bosque natural y artificial. CONIF. Serie Técnica No. 3, p. 23-36.
132. _____. 1976. La mineralización del nitrógeno en suelos de cenizas volcánicas de Colombia y su relación con el crecimiento de *Cupressus lusitanica*. Turrialba 26(1):18-24.
133. _____. 1979. Rendimiento y crecimiento de *Cupressus lusitanica* en Antioquía, Colombia. Crónica Forestal y del Medio Ambiente 1(2):1-43.
134. VILLACHICA, L.H. 1980. Manejo de praderas en el trópico húmedo americano. s.n.t. 44 p. (mimeo). Presentado en el Curso sobre Uso y Manejo de Suelos Forestales Tropicales, Turrialba, Costa Rica.
135. VINCENT, L.W. 1978. Site-classification for young Caribbean pine (*Pinus caribaea*) var. *hondurensis* in grasslands of Venezuela. Thesis Ph.D. Knoxville, University of Tennessee. 149 p.
136. WADSWORTH, F.H. 1968. New observations of the growth in Tabonuco forest. Caribb. FOR. 14:106-111.
137. WARING, H.D. 1971. The nutritional status of pine plantations in Malaysia. Techn. Report No. 1. MAL 12/UNDP/FAO, Kuala Lumpur. 49 p.

138. _____ . 1969. The role of nitrogen in the maintenance of productivity in conifer plantations. *Comm. For. Rev.* 48:226-237.
139. WEBB, L.J. 1969. Edaphic differentiation of some forest types in eastern Australia, II: soil chemical factors. *J. Ecol.* 57:817-829.
140. WELLS, C.G.; JORGENSEN, J.R. 1979. Effect of intensive harvesting on nutrient supply and sustained productivity. In Symposium on impact of intensive harvesting on forest nutrient cycling. Proceedings. New York College of Environmental Science and Forestry. School of Forestry, p. 212-231.
141. WERNER, P. 1980. Secondary forests in Costa Rica. Information note No. 1 (mimeo).
142. WHITE, D.P.; LEAF, A.L. 1960. Forest fertilization; a bibliography with abstracts on the use of fertilizers and soil amendments in forestry. New York. State University College of Forestry. Syracuse. Tech. publ. No. 81. 305 p.
143. WILL, G.M. 1968. The uptake, cycling and removal of mineral nutrients by crops of *Pinus radiata*. *Proc. N. Z. Ecol. Soc.* 15:20-24.
144. WITTICH, W. 1961. Die grundlagen der stickstoffernaehrung des waldes und moeglichkeiten fur ihre verbesserung. In *Der stickstoff; seine bedeutung für die landwirtschaft und die ernaehrung der welt.* Düsseldorf. N-Industrie, p. 331-371.
145. WORMALD, T.J. 1975. *Pinus patula*. Tropical forestry papers No. 7. C.F.I. Oxford, 60 p.
146. ZOTTL, H.W.; TSCHINKEL, H.M. 1971. Nutrición y fertilización forestal; una guía práctica. Medellín, Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional de Colombia. 116 p.

EL SUELO Y EL MANEJO DE CUENCAS HIDROGRAFICAS

El ciclo hidrológico

Para estudiar el comportamiento de una cuenca hidrográfica es necesario entender las entradas y las salidas físicas del área de captación, es decir, el ciclo hidrológico y sus procesos en la cuenca. Se necesita también entender que las funciones hidrológicas están determinadas por un cierto número de factores, entre ellos: clima local, condiciones fisiográficas e impactos del uso de la tierra, todos los cuales deben ser estudiados y entendidos antes de formular un plan de manejo y de desarrollo de la cuenca.

El ciclo hidrológico es la circulación del agua desde la atmósfera hacia la superficie de la tierra y su retorno a la atmósfera, a través de varias etapas o procesos tales como precipitación, intercepción, escorrentía superficial, infiltración, percolación, almacenamiento, evaporación y transpiración. Constituye un sistema enorme de procesos continuados, que requieren una vasta energía solar para mover grandes cantidades de agua a través de estas transferencias. La Fig. 43

es una representación general del ciclo hidrológico. La Fig. 44 (a y b) representa el ciclo global anual del agua y el ciclo general de la misma, en forma un poco más detallada que la Fig. 43. Las cantidades circulantes de masas de agua en el mundo difieren sustancialmente. Se puede decir en general que el 97% del agua total está contenida en los océanos, aún cuando su volumen exacto no es conocido con suficiente precisión. Tres cuartas partes del agua fresca del planeta son suministradas por las cápsulas polares. Estos grandes reservorios de agua fresca no permanecen constantes (Pereira²³). Este mismo autor indica que el agua

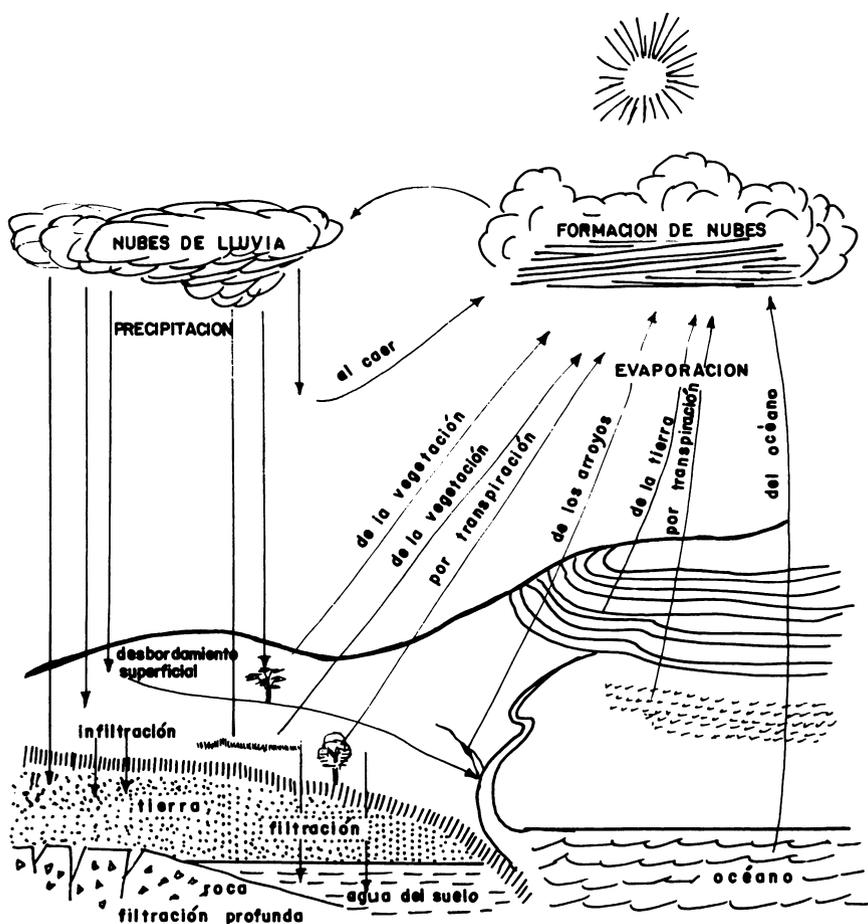


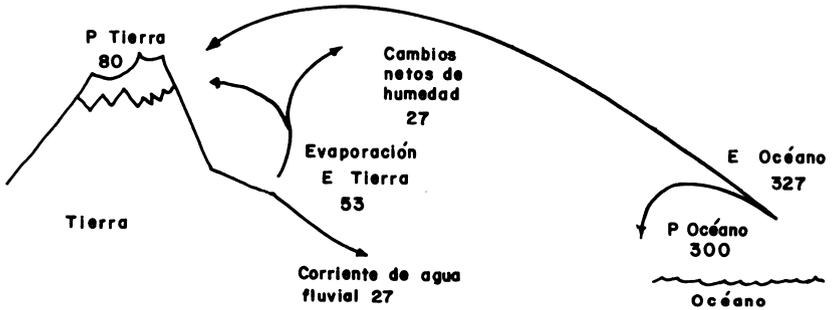
FIG. 42. El ciclo hidrológico.

fresca contenida en lagos, ríos y en los reservorios subterráneos, disponible para el hombre, es menos del 0.05% del contenido total mundial. Sin embargo, esta cantidad se estima que es superior a los 500 mil kilómetros cúbicos. Si esta cantidad de agua fuera mejor distribuída, alcanzaría ampliamente para todas las necesidades previsibles del hombre. Por otra parte, el contenido total de agua de la atmósfera, principalmente en los primeros 4.5 kilómetros, es solamente de alrededor de 25 milímetros o una pulgada, pero su distribución es altamente errática. La circulación atmosférica se debe principalmente a las diferencias de temperatura entre el Ecuador y los Polos, pero está sujeta a fluctuaciones muy grandes. La evaporación y la transpiración desde la superficie de la tierra contribuyen sorprendentemente muy poco a la precipitación total. Muchos estudios han coincidido en anotar que la mayor proporción de masas de agua de precipitación sobre la tierra (90%) es de origen marítimo y solamente el 10% se deriva de las superficies frescas, a partir de la vegetación o a partir de espejos de agua. La precipitación en forma de lluvia o nieve, desde la atmósfera, se intercepta en primera instancia por la vegetación. Esta parte de la precipitación puede evaporarse de nuevo hacia el aire. El resto alcanza la superficie de la tierra. Puede infiltrarse y almacenarse en el suelo, o percolarse en los sistemas de agua subterránea, o bien correr en forma superficial hacia los arroyos. El agua almacenada en el sistema del suelo está generalmente disponible para las plantas y en gran proporción es transpirada de nuevo a la atmósfera. Alguna cantidad de agua en el suelo es retenida sólo temporalmente y, eventualmente, contribuye al reservorio de agua subterránea o simplemente se evapora. El agua del acuífero subterráneo o de las corrientes fluye finalmente al océano, en donde el agua superficial se evapora nuevamente hacia la atmósfera, para completar el ciclo.

El hombre solamente puede manejar o alterar algunas partes de este sistema hidrológico en beneficio humano; esto lo hace en la cuenca hidrográfica. La Fig. 45 ilustra la nomenclatura más común y sencilla en la cuenca hidrográfica. La Fig. 46 representa el balance hídrico en una cuenca, en la forma explicada anteriormente.

Para cuantificar el balance hídrico de una cuenca hidrográfica, es necesario desglosar cada uno de los parámetros que intervienen en el ciclo hidrológico y medirlos experimentalmente o calcularlos. El Cuadro 77 representa los valores anuales de los flujos hidrológicos en ecosistemas boscosos.

a) Ciclo global-anual de agua



En unidades de 1×10^9 Acre Feet (Nace 1960)
 1 Acre Feet = 1.214 Metros cubicos

b) Ciclo general de agua

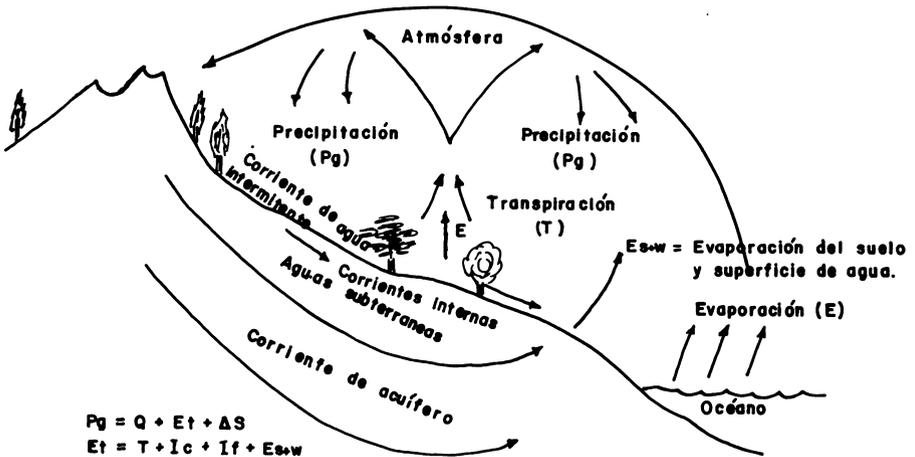


FIG. 43. Ciclo general y global anual del agua (según Hewlett y Nutter¹⁰).

CUADRO 77: Flujos hidrológicos de algunos ecosistemas de bosque (mm)

Parámetro	Sitio		
	San Eusebio, Venezuela 1/	Carare, Colombia 2/	Africa 3/
Lluvia (ingreso)	1576	3020	1092
Escurrimiento foliar	2260	2270	n.r.
Escurrimiento tallos	11.7	21 a/	n.r.
Intercepción	305	750	218
%	19	25	20
Ingreso al suelo	1272	2249	874
Escurrimiento Superf.	14.6	---	---
Δ Suelo	7	3 - 20 b/	n.r.
Evapotranspiración	981	1460 c/	1052
Egreso del suelo 4/	+ 588 (20)	+ 1500 a/ (60)	+ 197 d/ (320)
%	37	50	18

FUENTE:

1/ Grimm y Fassbender⁸; bosque de *Podocarpus rospigliosii* 2000 m 12.6°C2/ De las Salas²⁵; bosque húmedo tropical, 50 m, 27°C3/ Pereira²³; bosque de bambú. 2650 m (datos calculados a partir de información del autor)

4/ Entendido como percolación y posterior almacenamiento para recarga.

a/ dato estimado

b/ variación debida a fases de sequía y humedad del suelo durante el período de medición (1 año)

c/ estimada sobre la base de 4 mm/día

cifra entre () corresponde a la profundidad en cm, hasta la cual se midió la percolación del agua en el suelo

d/ promedio de ocho años de medición.

Efecto de la cobertura forestal sobre el régimen hídrico de la cuenca

Las investigaciones hidrológicas básicas, en las regiones tropicales húmedas en general y americanas en particular, son muy escasas y es necesario una mayor atención.

Se reconoce que el bosque, en su condición natural, ofrece un óptimo régimen de aguas y capacidad de conservar el suelo; pese a ello, existen grandes extensiones de terrenos degradados y el problema de las inundaciones se hace cada día mayor. Aunque no es posible atribuir toda la culpa a la deforestación, puede estimarse que se trata de una de las principales causas. De lo anterior se desprende la importancia que podrían tener sistemas de pastoreo, en los cuales exista al mismo tiempo una buena densidad de árboles.

Los problemas de inundaciones pueden aumentarse a causa de palizadas y exceso de despojos y sedimentos provocados por la erosión incontrolada y la deforestación aguas arriba. A menudo, la prin-

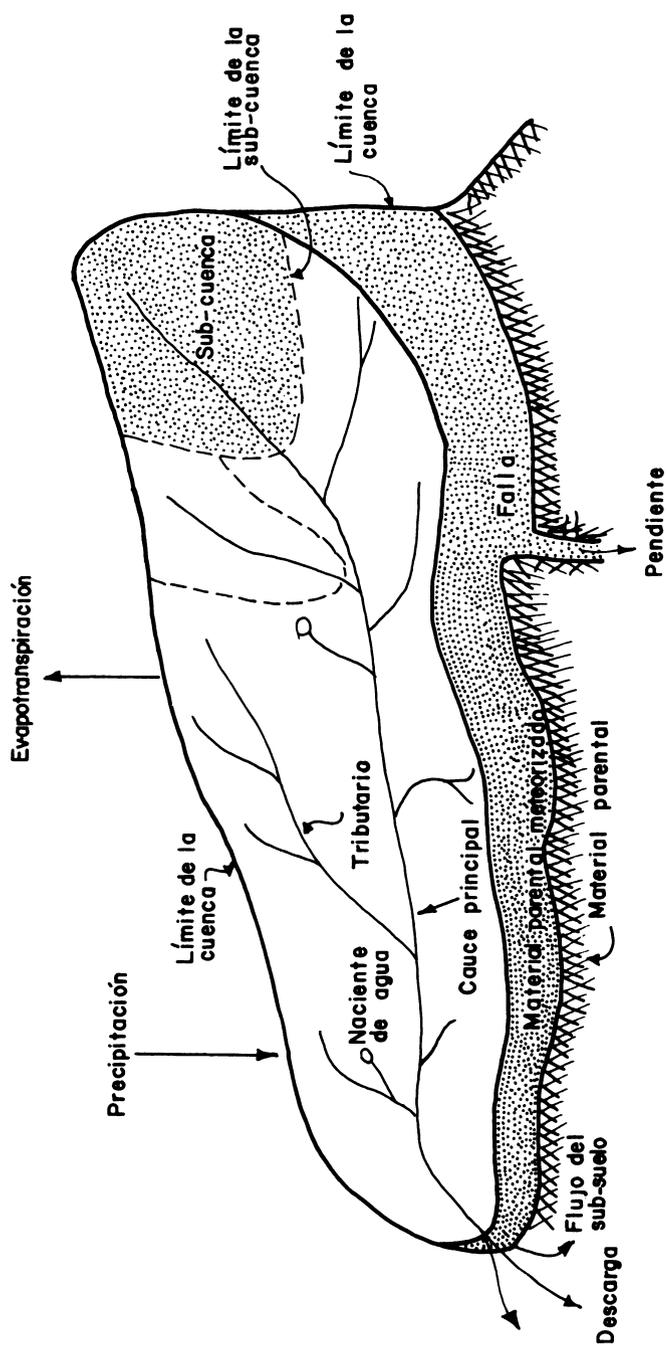


FIG. 44. Nomenclatura más común en una cuenca.

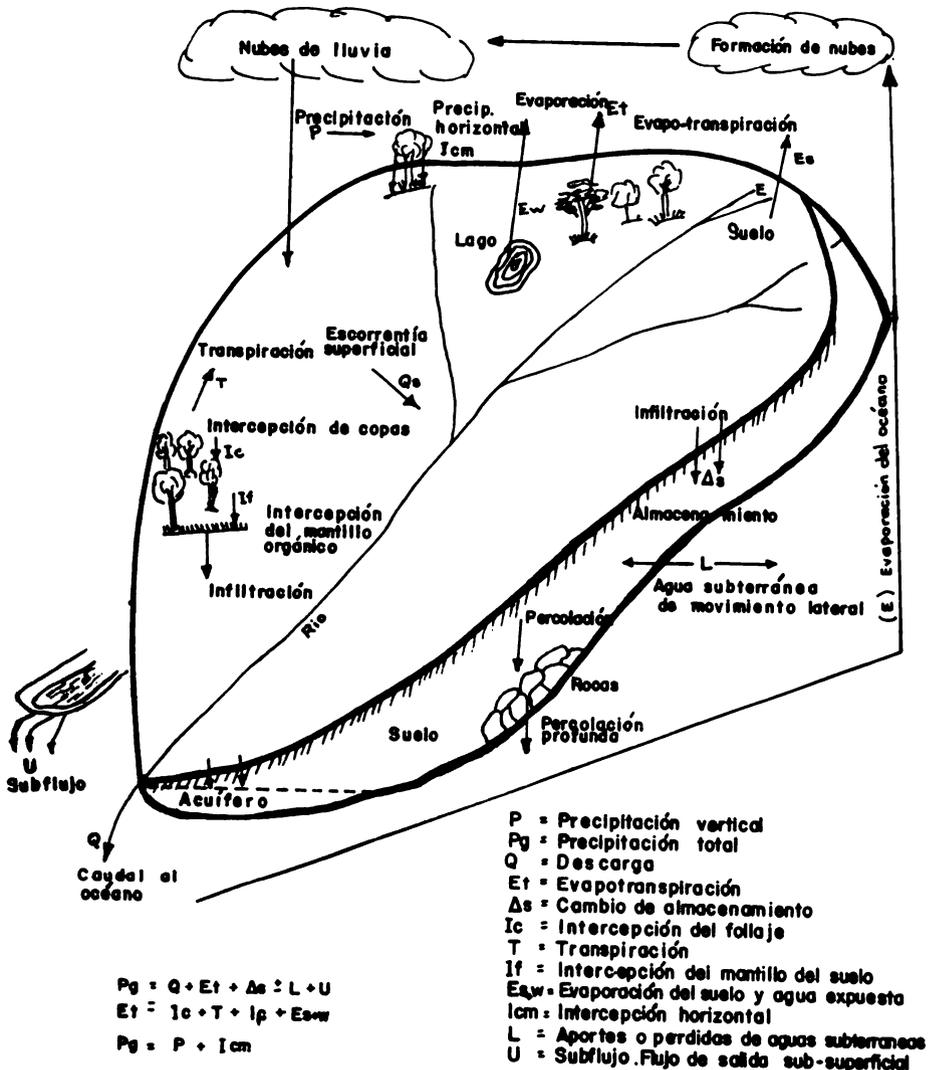


FIG. 45. Balance hídrico de una cuenca (según Hewlett y Nutter¹⁰).

principal función del bosque, como protección contra las inundaciones, es la de prevenir desprendimientos de tierra y mantener el sedimento grueso (arrastre de fondo) y otros restos fuera de la corriente. Estos materiales, con frecuencia, obstaculizan los cauces y elevan los niveles de crecidas del río. Luego, las presas de los despojos pueden romperse y dar origen a avenidas catastróficas o corrientes de barro (Kunkle¹³).

Una adecuada cubierta forestal ayuda a regularizar el caudal del río y a evitar los problemas de sedimentación, porque los grados de infiltración son por lo general más altos bajo cobertura boscosa que en terrenos cultivados o en pastizales (Pereira²³; Lal¹⁶; Salas, De las y Estribí, datos no publicados; Apolo¹; Penman²²).

El Cuadro 78 presenta algunos ejemplos sobre el comportamiento de diferentes coberturas vegetales.

CUADRO 78: Capacidad de infiltración del suelo bajo diferentes coberturas vegetales

Sitio y Autor	Tipo de Suelo	Prof. (cm)	Cap. infiltrac. cm/hr	Tiempo minutos
Turrialba, C. Rica (Apolo, 1980)	<i>Panicum laxum</i> + árboles aislados	Typic humitropept	7	20
			5	40
			4	60
Pacayitas C. Rica (de las Salas y Estribí) a/	Pasto rastrojo alto bosque primario	Humitropept	30	3
			10	120
			20	120
Africa occ. Lal, 1979 b/	Pasto <i>Stylosanthes</i> rastrojo	Alfisol	---	21
			---	21
			---	34

a/ datos no publicados

b/ información no publicada de Wilson, Lal y Okigbo, IITA. Ibadan, Nigeria.

Pereira²³ comenta que las experiencias de Africa del Sur han sido compartidas también por otros países africanos en repetidas ocasiones, tanto en áreas húmedas como semiáridas; esto puede ser válido también para otras regiones del mundo. En un amplio ámbito de latitudes y sin interferencia del hombre, las áreas bajo bosque con una alta precipitación mantienen flujos permanentes de agua. En la-

titudes altas, la precipitación, por lo general bien distribuída, usualmente mantiene este proceso a pesar de la colonización humana. En latitudes más bajas y más calientes y con una precipitación mucho más violenta, la cual ocurre en las estaciones lluviosas y separadas generalmente por un corto período seco, el balance hidrológico es más proclive a ser disturbado. Con el aumento de la población ganadera en las cuencas hidrográficas y consecuentemente del pastoreo y la formación de terracetas, junto con la práctica muy extendida de la quema, el resultado característico es un decrecimiento de la capacidad de la superficie del suelo para absorber fuertes lluvias. Esto aumenta la escorrentía superficial y conduce a la formación de picos de caudal en los arroyos. La disminución de la infiltración tiene como consecuencia una baja en la recarga de los acuíferos y, por lo tanto, una disminución en los reservorios de agua de las cuencas.

Respecto al consumo de agua por la cobertura forestal, debe definitivamente abandonarse la creencia popular de que tal tipo de vegetación aumenta la precipitación y por consiguiente el caudal de los embalses. Von Christen⁴ hizo un resumen juicioso de la literatura sobre cuencas hidrográficas disponible para Africa del Sur. Comenta que estos estudios indicaron que el bosque consume más agua que una vegetación más baja, pero tiene una gran importancia en las cordilleras tropicales húmedas como protector del suelo y regulador de los caudales. Aparte de su influencia benéfica sobre el balance hídrico y el suelo, el bosque manejado es una fuente de materia prima importante, como la madera. El autor citado opina que, solamente bajo condiciones especiales, se justifica reemplazar un bosque artificial de alta producción por una vegetación menos exigente en agua. Es de la opinión de que los bosques protectores, una vez establecidos a través de procesos de sucesión natural en un tiempo relativamente corto, deben permanecer en tal estado, siendo las plantaciones innecesarias y aun antieconómicas y a veces contraproducentes. Pereira²³ comenta que en las montañas de Ciudad del Cabo, Sudáfrica, el retorno comercial por metro cúbico de agua fue calculado como más rentable, a partir de una reforestación comercial, que bajo otra forma de agricultura, en este caso agricultura de irrigación. Los agricultores fueron aconsejados en el sentido de hacer el máximo uso de los subsidios del gobierno, con el fin de construir diques para almacenar el agua superficial, durante la estación lluviosa. Sin embargo, se llegó a la conclusión de que la reforestación debía restringirse solamente a unas áreas determinadas y que los embalses debían mantenerse, en lo posible, bajo una vegetación moderada, que sirviera de protección al suelo contra la erosión.

Generalmente existe controversia, con respecto al efecto de la vegetación artificial sobre el consumo de agua en las cuencas hidrográficas. En las zonas húmedas, varios autores (Pereira²³; Kunkle¹³) comentan que no existe evidencia de que el bosque nativo consuma menos agua que las plantaciones forestales a una misma altitud; y que las especies forestales tienen diferentes demandas de agua en plantaciones de la misma densidad sobre sitios similares. Von Christen⁴ opina que hay especies de alta y baja eficiencia de utilización de agua para la producción de madera, y que los cultivos agrícolas intensivos—sobre todo los fertilizados— consumen probablemente una cantidad similar de agua que plantaciones forestales comerciales. En la zona subhúmeda y seca, la reducción relativa de la producción de agua por las plantaciones forestales es crítica, ya que hay sitios en donde la precipitación no es suficiente para una reforestación comercial, sobre todo debido a épocas de sequía largas. Existen, por otra parte, especies que pueden adaptarse a las condiciones de sequía y por lo tanto son capaces de extraer más agua del suelo durante épocas secas marcadas. Por lo tanto, dichas especies están fuera de consideración para proyectos en los cuales el objetivo es la producción hídrica. Pereira²³, al resumir las experiencias de África del Sur y de la estación experimental de Tennessee Valley Authority (TVA) en Estados Unidos, concluye que los bosques nunca deben cortarse o plantarse en gran escala, sin un estudio juicioso de los cambios del potencial hidrológico esperados bajo tales cubiertas vegetales. Cambios en gran escala en el uso de la tierra pueden preverse a menudo a través de muchos años, particularmente cuando los proyectos se realizan para obtener una combinación de agua y madera. La reducción del riesgo, al involucrar trabajo experimental en las cuencas, puede ahorrar mucho dinero. La escorrentía superficial también puede ser alta, bajo algunas coberturas arbóreas tropicales. Por ejemplo, investigaciones en Trinidad han revelado una alta erosión bajo rodales puros de teca (*Tectona grandis*) (Bell²). Observaciones similares de erosión bajo teca se han hecho en El Salvador y Tailandia. De este modo, no es suficiente considerar una cobertura de árboles siempre como una buena protección para las cuencas, ya que las mismas especies, la calidad de los rodales de árboles, los efectos de los nutrimentos forestales, las prácticas silviculturales y otros factores deben tomarse en cuenta (Kunkle¹³).

El manejo de la cobertura vegetal

El tipo de vegetación juega un papel muy importante sobre la función dinámica del agua en el suelo. Como se dijo anteriormente,

algunas especies de raíces profundas de los árboles pueden transpirar mucha más agua que especies vegetales de raíces poco profundas, creando entonces una capacidad de almacenamiento máximo para precipitaciones posteriores. La vegetación afecta la cantidad de agua que puede ser almacenada en los suelos, a través de la influencia que la materia orgánica tiene sobre la capacidad de almacenamiento, sobre las partículas del suelo y sobre la profundidad de éste y del agua que extraen las plantas, por medio del proceso de transpiración. En cualquier momento, la oportunidad de almacenar y retener agua en los suelos depende no solamente de la capacidad de retención de agua por parte del suelo, sino también de la cantidad existente en el acuífero en un momento dado.

En el manejo de la vegetación de las cuencas hidrográficas, es importante tener en cuenta que cuencas bien manejadas, con superficies dedicadas a la agricultura, pueden comportarse en forma similar hidrológicamente a cuencas con vegetación forestal o reforestadas. Estudios en el África del Este, comentados por Pereira²³, por ejemplo, mostraron que 11 años después de cambiar un bosque lluvioso montano de una cuenca a plantaciones de té, no se encontró diferencia significativa entre los dos tipos de uso del suelo con respecto al rendimiento en agua. Se comprobó que el consumo medio anual de agua fue el mismo para ambas formas de uso del suelo. Aproximadamente 1300 mm por año se evaporaron de ambas superficies, es decir, bosque lluvioso montano y cobertura continua de cultivo de té, con sombra de algunos árboles que lo reemplazaron. Ambos tratamientos dieron un promedio de agua utilizada —(Et) agua consumida por la vegetación; (Eo) de 0.8—. La Fig. 47 ilustra el caso, que se cita por su relativa importancia, dentro de los pocos ejemplos que existen para los trópicos. Esta situación podría presentarse en algunas regiones de América Tropical, por cuanto el experimento se realizó en condiciones ecológicamente similares a valles, como por ejemplo el del Cauca, en Colombia. De la Fig. 47 se deduce que el uso del agua y el rendimiento de la misma, en particular durante la estación seca, no fueron afectados significativamente por el uso total del suelo en la cuenca.

Los autores de esta investigación (citados por Pereira²³) aclaran que las conclusiones de este experimento, si bien abarcan un tiempo relativamente largo (11 años), son válidas únicamente para el estado de desarrollo de la cuenca en el cual fue investigada, pero no esperaban muchos cambios en el futuro desarrollo de la vegetación.

—○—○—○— Área control con bosque
 —▲—▲—▲— Área aclareada y plantada: (a) bajo bosque, (b) aclareo y plantación, (c) cubierta de té y árboles de sombra, (d) sombra completa de té.

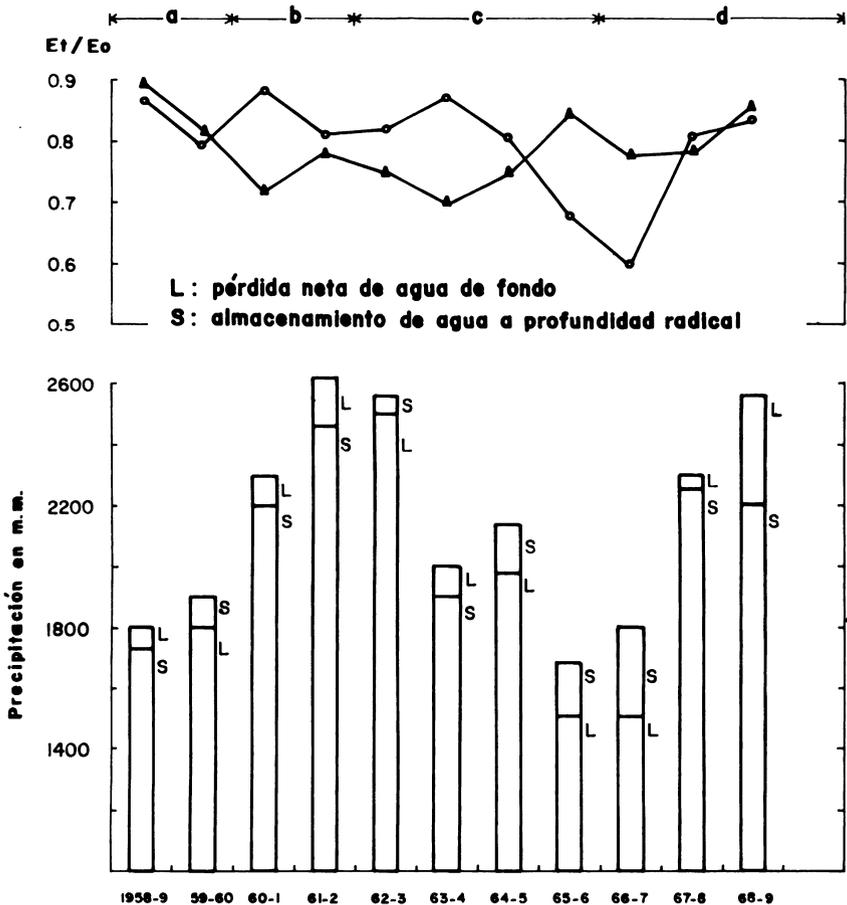


FIG.46. Precipitación y tasa de consumo de agua (Et/Eo) de un bosque y una plantación de té en Kericho, Africa del Este. El área control mostró uniformidad de consumo de agua con una proporción Et/Eo de 0.83 disminuída notablemente en los años de sequía. FUENTE: Pereira ²³.

Ramírez²⁴ estudió el cambio de caudal por efecto de la reforestación de una cuenca hidrográfica en Colombia (1700 mm, 15°C, 2000 m de altitud). Los análisis hidrológicos evaluados por medio de curvas de regresión y correlación simple, no indicaron cambios significativos en los caudales promedios ni en las descargas máximas y mínimas. Aunque el autor expresa que los resultados deben mirarse con reserva, debido a que no existía una cuenca testigo con la cual comparar los resultados de la reforestación que tuvo lugar en la cuenca por más de 30 años, el estudio debe considerarse como un paso preliminar para investigaciones futuras más completas, con respecto al consumo de agua por la vegetación y al rendimiento del caudal. Existen muy pocos datos sobre el consumo real de agua por las plantaciones forestales en los trópicos. Hay controversia sobre si plantaciones exóticas consumen o no más agua que especies nativas. Sin embargo, existen estudios que prueban que las especies exóticas, como eucalipto, consumen mucha más agua por unidad de superficie y año que un bosque maduro natural.

Este es el caso expuesto por Bailly (citado por Kunkle¹³). Este autor trabajó una cuenca hidrográfica de aproximadamente 2000 mm de precipitación anuales en Madagascar y concluyó que, sin lugar a dudas, una vieja plantación de eucalipto consumió entre 100 y 200 mm de agua por año, más que un bosque nativo, para las condiciones en las cuales se llevó a cabo la investigación.

El efecto protector de un pastizal bien manejado podría emplearse para lograr una mayor producción hídrica, debido a su menor evapotranspiración, en comparación con la del bosque y algunos cultivos. Hall y Dracup⁹ estiman que si la evapotranspiración se reduce a un uno por ciento, a ello corresponde probablemente un aumento del 20% en el caudal medio del río. La cifra es muy importante, si consideramos la planificación del uso del suelo en las cuencas, cuyo objetivo más importante es la regularización y el aumento del caudal de los embalses a largo plazo. Sin embargo, el uso de la tierra con pastizales podría representar graves problemas en lugares muy húmedos, especialmente cuando el efecto regulador del bosque se pierde y la permeabilidad del suelo baja, como consecuencia de la compactación por el pisoteo del ganado.

El principal efecto benéfico de la cubierta herbácea en la ordenación de una cuenca hidrográfica consiste en mantener la erosión en grados tolerables, debido a su sistema extensivo de raíces fibrosas, que aglutinan el suelo, y a su efecto protector contra las gotas de llu-

via. Es conocido, por otra parte, que una de las grandes ventajas de los bosques, en comparación con otros tipos de vegetación, es la presencia de una capa protectora del suelo, compuesta por el mantillo (generalmente espeso). Esta capa permite la infiltración del agua y regula su percolación a capas profundas del suelo, aun en pendientes fuertes, previniendo la acumulación superficial de la misma y su acción erosiva. Según el tipo de clima y de bosque, esta capa orgánica puede variar en composición y espesor. Los climas calientes y estacionales, con humedad alta, favorecen una mineralización rápida de la materia orgánica y, por consiguiente, las capas de humus son relativamente delgadas.

La descomposición de las agujas de ciprés, por ejemplo, es relativamente rápida y por ende la hojarasca es insuficiente para proteger el suelo. Una buena cobertura vegetal es particularmente importante en suelos susceptibles a la erosión y deficientemente drenados. Este es el caso de muchos suelos en las cordilleras andinas del trópico americano. En suelos con una alta capacidad de absorción de agua (suelos Andosoles), las diferencias en el grosor y el tipo de cobertura rastrera (mantillo y vegetación menor) son aparentemente irrelevantes para el comportamiento dinámico del agua. La erosión, por otro lado, es probable que se deba a un mal uso de la tierra más que a un efecto de la cobertura vegetal en sí misma.

La selección de la cobertura vegetal para prevenir la erosión implica una evaluación del grado de adaptabilidad, de las condiciones morfológicas y del valor económico de utilización de las especies que se desean ensayar. Las características más deseables en especies arbóreas y arbustivas para el control de la erosión podrían ser las siguientes:

- buena sobrevivencia y rápido crecimiento en sitios empobrecidos o marginales;
- habilidad para producir una gran cantidad de mantillo;
- sistema radical fibroso y superficial;
- establecimiento rápido y poca necesidad de mantenimiento;
- resistencia a plagas y enfermedades;
- capacidad para formar una cobertura densa, tal que retenga las fuertes gotas de lluvia en aguaceros torrenciales;
- capacidad para mejorar el suelo, como nutricación a través de especies leguminosas;

producción de algunas entradas económicas, particularmente sobre la base de un corto tiempo (frutos, nueces, forraje, leña y otros).

El manejo de la cobertura vegetal en las cuencas hidrográficas es muy importante para minimizar las tasas de escorrentía superficial y el arrastre de sedimentos por unidad de superficie. El Cuadro 79 ilustra algunos ejemplos de la influencia del tipo de cobertura vegetal sobre los dos parámetros mencionados. A la luz de estos datos, puede observarse la eficiencia de algunas coberturas vegetales en parcelas experimentales, respecto de la disminución de la escorrentía superficial y de la erosión superficial del suelo. En el ejemplo de cafetales colombianos, se observa que tanto el arrastre de sedimento como la escorrentía superficial fueron máximos bajo cultivo de maíz sin cobertura alguna. Los ejemplos costarricenses deben tomarse con cierta reserva, por cuanto el tiempo de experimentación no fue suficiente para arrojar datos contundentes. Sin embargo, se debe destacar en este ejemplo que el cafetal sin sombra, manejado, es más efectivo que un cafetal viejo con sombra (generalmente maderables y leguminosas), pues las tasas de escorrentía en el caso del cafetal sin sombra corresponden casi a la mitad (1.4% de la lluvia) que las experimentadas con la protección de la sombra (2%). Sin embargo, el efecto es completamente contrario cuando se comparan las tasas de arrastre de sedimento en ambos tratamientos. Para el caso del cafetal con sombra, la proporción es de 1/3 (0.1 t/ha/año contra 0.37 t/ha/año, estimadas en el tratamiento del cafetal sin sombra). Para los mismos ejemplos de Costa Rica, el pasto con árboles aislados (Apolo¹) arrojó en forma sorpresiva mayores arrastres de sedimentos y mayor porcentaje de escorrentía, en suelos y pendientes similares a los experimentos explicados anteriormente. Aunque estas cifras son relativamente bajas con respecto a los resultados de otros autores, resultan comparables con los datos del tratamiento de pasto más *mulch*, dados en el ejemplo colombiano (Suárez de Castro y Rodríguez Grandas²⁶). Para el caso mexicano, la cobertura del bosque de Oyamel produce dos veces menos sedimento que un bosque de pino y cuatro veces menos que un bosque de encino. Los cultivos, para este experimento en la Cuenca del Río Texcoco, produjeron los mayores arrastres de sedimentos (3.06 t/ha/año). El caso de superficies cubiertas de Tepetate (*duripan*) no es comparable con situaciones normales, puesto que obviamente este *duripan*, cerca de la superficie del suelo, causa tasas de arrastre extremadamente altas. En el ejemplo de África, se nota claramente el efecto del *mulch* como protector del suelo, comparable con la cobertura del bosque.

CUADRO 79: Escorrentía y tasas de erosión bajo diferentes coberturas vegetales.

Sitio y Autor (es)	Tipo de suelo	Cobertura	Escorrentía (% lluvia)	Arrastre de Sedimento (t/ha/año)	Observaciones
Colombia Suárez de Castro y Rodríguez-Grandas (1962)	Andept	Cafetal viejo	2.2	0.5	Datos promedio de 18 sitios durante 6 años
		Cafetal joven	8.7	2.2	
		mulch + pasto	25.9	32.1	
		veg herbácea	29.6	37.7	
		(<i>Indigophera indica</i>)			
		Maíz en rastrojo	39.0	166	
		Maíz (monocultivo)	59.0	798	
Costa Rica Bermúdez (1980) Apolo (1980)	Inceptisol	Cafetal con sombra	2.0 a/	0.10 a/	Datos de parcelas experimentales con pendiente de 30%
		Cafetal sin sombra	1.4 a/	0.37 a/	
		Pasto con árboles aislados	24.0	1.9	
México, (Texcoco) Figueroa (1975) b/		Pino		0.01	Datos experimentales en la Cuenca del Río Texcoco
		Zacate		0.04	
		Bosque de Oyamel (<i>Abies religiosa</i>)		0.005	
		Cultivos		3.06	
		Tepetates c/ Bosque de Encino (<i>Quercus sp</i>)		16 0.02	
Africa (Nigeria) Lal, R. <i>et al</i> (1974)	Ultisol	Maíz sin mulch	17.6		Datos experimentales del IITA, Ibadán (parcelas con pendientes del 15%)
		Maíz con mulch	1.9		
		Bosque	2.0		

a/ Resultados solamente de seis meses

b/ Original no consultado; datos tomados de Ortíz y Martínez ²¹

c/ Denominación mejicana para suelos con una capa endurecida (*Duripán*), generalmente a pocos cm de la superficie.

En el manejo de la cobertura vegetal es muy importante tener una idea del tipo y cantidad de interceptación de lluvia que puede caracterizar una cobertura vegetal. Aunque éste es uno de los varios parámetros componentes del balance hídrico, su conocimiento puede indicar, por inferencia, qué proporción del agua llovida es infiltrada a través de las copas de los árboles, cuando hay una cobertura forestal u otro tipo de vegetación, y alcanza efectivamente el suelo. Este tipo de análisis se trata en detalle en otros libros especializados en hidrología, por lo que se remite al estudiante interesado a la consulta de la literatura específica sobre el tema. Existen suficientes experimentos sobre la interceptación de la lluvia por diferentes coberturas vegetales en las cuencas hidrográficas. Las mediciones son aparentemente fáciles y ello ha conducido a errores en los resultados, debido a que el problema de muestreo plantea situaciones a veces bastante complicadas. Pereira²³ explica que ya se tienen publicados suficientes datos para establecer que la interceptación depende primordialmente del carácter físico de la lluvia. Lluvias muy ligeras de tamaños de

gota pequeños pueden ser interceptadas totalmente, mientras que lluvias fuertes o pesadas, en las cuales el tamaño de las gotas es muy grande, saturan rápidamente la cobertura y transmiten la mayor parte del agua hacia estratos inferiores. Este es un proceso físico independiente del carácter biológico del follaje. Se ha comprobado que las diferentes coberturas vegetales producen una curva de carácter hiperbólico, cuando se compara la cantidad de lluvia y el porcentaje de la misma interceptada. Por consiguiente, la importancia hidrológica de la interceptación por una copa continua de árboles, depende directamente del patrón de la precipitación y es similar para muchas especies. Pereira²³, a partir de la consulta de varios investigadores hidrólogos, concluye.

1. Las pérdidas por interceptación son principalmente una función del tamaño de la tormenta.
2. La mayoría de los árboles de latifoliadas presentan un efecto de interceptación similar durante la estación del crecimiento;
3. Las pérdidas por interceptación son mayores en los bosques de coníferas que en los bosques de hoja ancha.
4. Hidrológicamente, la interceptación representa una forma adicional pero transitoria de almacenamiento de agua en la vegetación de una cuenca hidrográfica.
5. El mayor interés de los estudios se debe centrar en las contribuciones relativas de la transpiración y de la evaporación directa del agua sobre toda la cuenca hidrográfica.

Algunos datos de interceptación se resumen en el Cuadro 80 para bosques tropicales y templados.

La planificación del uso del agua en las cuencas

Una de las partes más importantes en el proceso de planificación es el estudio de la disponibilidad de los recursos hídricos, del costo de su aprovechamiento y de las implicaciones ambientales de éste. Eso porque los planes son de carácter esporádico cuando se trata de definir programas que deberán ser cumplidos o estrategias a ser seguidas, mientras que los estudios de los potenciales de desarrollo de los recursos deben ser permanentes y pasar por un proceso, que empieza en el inventario y atraviesa las etapas de prefactibilidad y factibilidad, hasta la toma de decisión para el desarrollo del proyecto.

CUADRO 80: Valores de intercepción de lluvia para diferentes bosques tropicales.

Sitio y Autor	Lluvia interceptada (%)		Observaciones
Costa de Marfil Cachan y Duval	50	95	Datos citados por Lamprecht ¹⁸
Yangambi, Congo Focan y Fripiat	19.7	(1859)	Datos citados por Lamprecht ¹⁸
Malasia (bosques de Dipterocarpaceas) Brunig, 1971	20	(2500)	
Venezuela, bosque de <i>Podocarpus rospigliosii</i> , Grimm y Fassbender ⁸	19	(1876)	
Turrialba, Costa Rica Zambrana ²⁷	16	(2700)	
Carare, Colombia de las Salas ²⁵	25	(3000)	
Africa, bosques de bambú Pereira ²³	20	(32) a/	
Africa, bosque de ciprés Pereira ²³	20	(32) a/	

Cifra entre paréntesis es la lluvia promedio anual.

a/ dato para eventos de una sola intensidad.

Esos estudios comienzan entonces con la determinación del potencial de agua disponible, lo cual sirve solamente para identificar posibles conflictos, debidos a la escasez del recurso cuando se compara con la demanda requerida en un balance preliminar. Balance que puede, a su vez, servir para determinar algunas estrategias a seguir en el redimensionamiento de la demanda o en los estudios de aprovechamiento de los recursos. Otro subproducto de ese estudio es determinar los requerimientos de información para los estudios de etapas posteriores (Holz¹¹).

Un flujograma de los estudios de prefactibilidad se muestra en la Fig. 48, como ejemplo, bastante similar al flujograma de los estudios de factibilidad. Ambos se realizan en dos fases, de acuerdo con su profundidad, eliminando alternativas, para dedicar un esfuerzo más grande (y costoso) a las más promisorias.

Dentro del título de "estudios especiales", se incluyen los estudios socio-económicos del área, el análisis de la cuenca sobre un enfoque de uso múltiple, la evaluación de los costos y de uso potencial de la tierra y los estudios de apoyo logístico para implantación de los aprovechamientos particularmente los apoyos disponibles en el área (Holz¹¹).

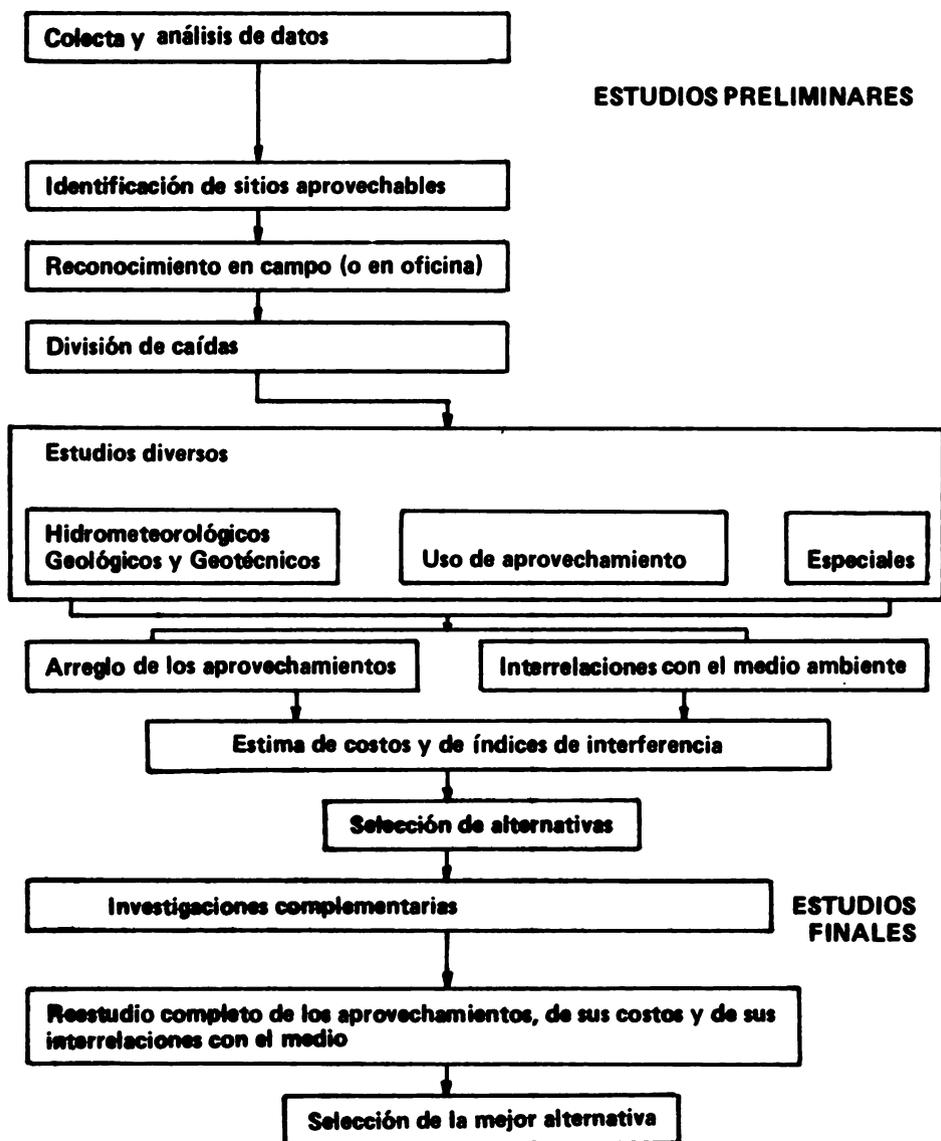


FIG. 47. Flujoograma de estudios (de pre-factibilidad y factibilidad para la planificación de uso del agua en una cuenca).

FUENTE: Holz¹¹

El resultado de los estudios especiales se indica como "interrelaciones con el medio ambiente", las cuales pueden ser positivas (beneficiosas) o negativas (conflictos), según el caso. No siempre es posible cuantificar las interrelaciones en términos de costos y, muchas veces, se trabaja con índices que representan el grado de interferencia dentro del conjunto de componentes del espacio afectado, y en las actividades y organización socio-económica relacionadas con el espacio.

A través de la secuencia de estudios de evaluaciones de oficina, de estudios de prefactibilidad y de factibilidad, se puede elegir, respectivamente, la mejor área para ser sometida a estudios más profundos, la mejor secuencia de aprovechamiento para desarrollar una cuenca y la mejor solución para un determinado aprovechamiento. Pero tales informaciones son todavía datos de entrada para la planificación, pues el planificador tendrá que trabajar, entre otros, con problemas como:

elección entre cuencas diversas;

definición de la secuencia de los aprovechamientos de agua en el tiempo, para atender las demandas diversas;

comparación con el uso de insumos sustitutivos (como energía termoeléctrica en el caso de electricidad; cemento, plástico para el caso de madera);

consideración de que la demanda proyectada y los aportes futuros de agua deben ser tratados como fenómenos estocásticos, ya que hay siempre el riesgo de que esa demanda no sea atendida;

definición del nivel de **riesgo aceptable** en función del costo del déficit para el usuario.

Al tener todo eso en cuenta, el planificador realiza el balance entre las diversas alternativas de aprovechamientos hídricos disponibles y las demandas, obteniendo como resultado secuencias alternativas de aprovechamientos, cada una con sus respectivos costos y sus interrelaciones con el medio ambiente (si es posible, cuantificadas por índices o costos).

La evaluación de los recursos humanos, financieros, tecnológicos e industriales de dichas alternativas y las orientaciones que vienen del plan de desarrollo integrado, permiten la elección de una alternativa (Holz¹¹).

La planificación de cuencas hidrográficas está fuera de los objetivos de este capítulo, por lo que se sugiere a los lectores interesados consultar literatura apropiada (ver por ejemplo: OEA ; Pereira²³; Holz¹¹; Dourojeanni y Terence Lee⁵; National Academy of Sciences¹⁹; FAO^{6, 7}).

RESUMEN

1. Para estudiar el comportamiento de una cuenca hidrográfica es necesario entender las entradas y salidas físicas del área de captación, es decir, el ciclo hidrológico y sus procesos en la cuenca. Se necesita también entender que las funciones hidrológicas están determinadas por varios factores, a saber: clima local, condiciones fisiográficas, impactos del uso de la tierra, cobertura vegetal, situación geográfica, entre otros.
2. El ciclo hidrológico es la circulación del agua desde la atmósfera hacia la superficie de la tierra, a través de la precipitación, intercepción, escorrentía, infiltración, percolación, almacenamiento, evaporación y transpiración. Para calcular el balance hídrico, es necesario medir experimentalmente estos parámetros o estimarlos.
3. Una cobertura forestal bien manejada regulariza el caudal del río, disminuyendo la sedimentación y protegiendo el suelo contra la erosión, por efecto del impacto de las gotas de lluvia. Afir-mar que el bosque aumenta el caudal de los ríos en una cuenca, es un mito que debe abandonarse definitivamente. A menudo, el bosque consume más agua que una vegetación baja. Por lo tanto, cuando el objetivo del manejo es la economía hídrica, no es aconsejable una vegetación con alto consumo de agua.
4. La práctica, cada vez más extendida, de la ganadería y de la que-ma en las cuencas hidrográficas, produce la formación de terracetas, cuyo resultado más conspicuo es el decrecimiento de la capacidad de infiltración del suelo. Este hecho aumenta a su vez la escorrentía superficial y lleva a una baja en la recarga de los acuíferos.
5. Existen muy pocos datos sobre el consumo real de agua por las plantaciones forestales en los trópicos. Hay controversia sobre si plantaciones exóticas consumen más agua que especies nativas, aunque algunos estudios prueban que las exóticas como el *Eucaliptus* consumen mucha más agua, por unidad de superficie y año, que un bosque natural maduro.

6. La selección de la cobertura vegetal en las cuencas deben evaluar condiciones morfológicas, adaptabilidad y el valor económico de las especies que se desean ensayar. Las características más deseables en especies arbóreas y arbustivas son, entre otras, las siguientes: a) buena sobrevivencia y rápido crecimiento en sitios empobrecidos o marginales; b) habilidad para producir buena cantidad de mantillo; c) sistema radical fibroso y superficial; d) establecimiento rápido y poca necesidad de mantenimiento; e) resistencia a plagas y enfermedades; f) capacidad para formar una cobertura densa y mejorar el suelo; g) producción a corto plazo de frutos, forraje, leña y otros bienes y servicios.
7. La importancia hidrológica de la intercepción de lluvia por una cubierta continua de árboles, depende del patrón de precipitación y es similar para muchas especies. Sin embargo, las pérdidas por intercepción, según varios autores, son mayores en bosques de coníferas que de latifoliadas.
8. Cuencas hidrográficas bien manejadas, con superficies dedicadas a la agricultura, pueden comportarse en forma similar, hidrológicamente, a cuencas con vegetación forestal o reforestadas. Estudios en Africa del Este mostraron que 11 años después de cambiar un bosque lluvioso, en una cuenca, por plantaciones de té, no se encontró diferencia significativa entre los dos tipos de uso del suelo, con respecto al rendimiento en agua. Pereira²³, al resumir las experiencias de Africa del Sur y de la estación experimental de Tennessee Valley Authority (TVA) en Estados Unidos, concluye que los bosques nunca deben cortarse o plantarse en gran escala, sin un estudio juicioso de los cambios del potencial hidrológico esperados. La reducción del riesgo, al contemplar el trabajo experimental en las cuencas, puede ahorrar mucho dinero.
9. Una de las partes más importantes en el proceso de planificación es el estudio de la disponibilidad de los recursos hídricos, del costo de su aprovechamiento y de las implicaciones ambientales de éste. Para ello, son necesarios los estudios de pre-factibilidad y factibilidad.

BIBLIOGRAFIA

1. APOLO, W.A. 1980. Evaluación de la escorrentía superficial y la erosión en un pastizal con árboles aislados en "La Suiza", Turrialba, Costa Rica. Tesis M. Sc. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y Universidad de Costa Rica (UCR). 69 p.
2. BELL, T.I.W. 1973. Erosion in Trinidad teak plantations. *Commonwealth Forestry Review* 52(3):223-233.
3. BERMUDEZ, M.M. 1980. Erosión hídrica y escorrentía superficial en el sistema de café (*Coffea arabica*), poró (*Erythrina poeppigiana*) y Laurel (*Cordia alliodora*) en Turrialba, Costa Rica. Tesis M. Sc. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y Universidad de Costa Rica (UCR). 73 p.
4. CHRISTEN, H. VON 1981. Consideraciones sobre el manejo de las cuencas hidrográficas con énfasis especial en el papel de la silvicultura. Asociación Colombiana de Reforestadores. 15 p. (mimeo).
5. DOUROJEANNI, A.; LEE, T. 1982. La gestión ambiental y las grandes obras de infraestructura hidráulica. Reunión regional temática de cooperación y coordinación interagencial sobre ordenamiento ambiental de cuencas hidrográficas. 1981. Mérida, PNUMA/CIDIAT.
6. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. 1977. Guidelines for watershed management. FAO Conservation Guide No. 1 Roma. 193 p.
7. _____. 1976. Hydrological techniques for upstream conservation. FAO Conservation Guide No. 2. Roma. 134 p.

8. 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* 31(2):89-99.
9. HALL, W.A.; DRACUP, J.A. 1970. *Water resources systems engineering*. McGraw-Hill. 372 p.
10. HEWLETT, J.D.; NUTTER, W.L. 1969. *An outline of forest hidrology*. University of Georgia Press. Athens. 137 p.
11. HOLZ, T.A.C. 1982. Estudio de caso de manejo ambiental: desarrollo integrado de un área en los trópicos húmedos, la Selva Central del Perú. Informe sobre recursos hídricos. OEA/PNUMA/ONERN. Lima, Perú, 65 p. y 2 anexos.
12. _____. 1982. Política e planejamento do setor de energia eléctrica no Brasil. Notas de Aula para o I Curso Regional de Projetos de Energía Eléctrica do BIRD/IDE/CENDEC.
13. KUNKLE, S.H. 1974. Water; its quality often depends on the forester. *UNASYLVA* 26(105).
14. _____. 1978. Manejo de cuencas hidrográficas; problemas y oportunidades. p. 78-98. In Zadroga, F. y Morales, R. (eds.). Taller regional sobre manejo de cuencas hidrográficas y áreas silvestres. UNESCO/PNUMA/Rockefeller. B.F./CATIE. Turrialba, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 98 p. (mimeo).
15. _____. 1978. Forestry support for agriculture through watershed management windbreaks and other conservation measures. In 8th World Forestry Congress. Jakarta, Oct. 16-28. 26 p. (mimeo).
16. LAL, R. 1979. Effects of cultural and harvesting practices on soil physical conditions. p. 327-351. In Mongi, H.O. y Huxley, P.A. (eds.). *Soils research in agroforestry. Proceedings of an expert consultation*. International Council for Research in Agroforestry. Nairobi. 584 p.
17. _____. *et al.* 1974. Problemas del manejo de suelos y posibles soluciones en Nigeria Occidental. p. 380-417. In Mane-

jo de suelos en América Tropical. Seminario celebrado en el Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia (Alvarado y Bornemisza, eds.).

18. LAMPRECHT, H. 1973. Zur ökologische bedeutung des waldes im tropenraum (El significado ecológico del bosque en el trópico). Forstarchiv. 44(6):117-123.
19. NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES. 1982. Ecological aspects of development in the humid tropics. Washington, D.C. National Academy Press. 207 p.
20. ORGANIZACION DE ESTADOS AMERICANOS. 1978. Calidad ambiental y desarrollo de cuencas hidrográficas: un modelo para planificación y análisis integrados. Washington, D.C. 118 p.
21. ORTIZ, R.T.; MARTINEZ, M.M. 1982. Manejo de la Cuenca del Río Texcoco con fines de conservación de suelos. p. 561-589. In I Congreso Nacional de Cuencas Hidrográficas. Memorias. Medellín, Colombia (mimeo).
22. PENMAN, H.L. 1963. Vegetation and hidrology. Commonwealth Agricultural Bureau. Technical Communication No. 53.
23. PEREIRA, H.C. 1973. Land use and water resources in temperate and tropical climates. Cambridge University Press. 245 p.
24. RAMIREZ, R.J. 1971. Relaciones entre el aumento de la reforestación y la producción de agua en la cuenca hidrográfica de Piedras Blancas. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrícolas. Centro de Publicaciones. 54 p.
25. SALAS, G. DE LAS. 1973. Características y dinámica de un ecosistema forestal en el Valle Medio del Magdalena, Colombia. Tesis Ph.D. (original en alemán). Universitat Göttingen. Göttingen bodenkundliche Berichte. 27:1-206 p.

26. SUAREZ DE CASTRO, F.; RODRIGUEZ GRANDAS, A. 1962. Investigaciones sobre la erosión y la conservación de los suelos en Colombia. Federación Nacional de Cafeteros. 473 p.
27. ZAMBRANA, R.H.A. 1982. Comparación y evaluación de la intercepción de lluvias en dos tipos de bosques tropicales. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, UCR-CATIE. 1975. 661 p. In Jiménez Saa, H. (comp.). Resúmenes de las tesis de grado de Magister Scientiae presentadas en el Departamento de Recursos Naturales Renovables del CATIE. Serie Bibliotecología y Documentación. Bibliografía No. 7. 177 p.

EL USO DE LA TIERRA Y LA TOMA DE DECISIONES

Definición del problema

Los países tropicales y subtropicales —con contadas excepciones— son regiones típicamente agrícolas, cuyo desarrollo depende en gran medida de la actividad agrícola, pecuaria y forestal. La producción agraria en América Latina ha aumentado a un ritmo anual promedio del 3% en los últimos 25 años. La tasa de aumento poblacional y el mejoramiento de la situación socioeconómica no han guardado relación con el nivel de esta producción. Los bajos rendimientos de las cosechas agrícolas en suelos no apropiados para agricultura, unidos a la explosión demográfica, dificultan la situación agroeconómica, la cual se ve agravada por la distribución de la población y la migración hacia las ciudades.

Al problema anterior se suma la crisis del petróleo, que ha sacudido la economía agraria de los países no productores del recurso. Además, el alto costo de los insumos agrícolas no permite el uso rentable del suelo, sobre todo en regiones de alta presión sobre la tierra, con estructura de minifundio. Para aliviar la si-

tuación, los gobiernos (especialmente los del trópico húmedo) han permitido la apertura de la frontera agrícola en la mayoría de los casos, a expensas de los bosques naturales aún existentes. Se calcula que aproximadamente 300 000 hectáreas de bosques naturales son destruidas cada año solamente en el Istmo Centroamericano, y más de dos millones en Sud-américa, principalmente para practicar una agricultura y ganadería no rentables. El bosque tumbado corresponde a zonas de pendientes pronunciadas, alta precipitación, suelos frágiles e infértiles o con otras limitaciones significativas para su uso. Tales áreas generalmente son destruidas como consecuencia de procesos espontáneos de colonización. Estas regiones constituyen, en su mayoría, cuencas hidrográficas, de cuyo régimen biofísico dependen la agricultura y la ganadería en zonas adyacentes o situadas aguas abajo. Su manejo apropiado representa, por lo tanto, un aspecto crítico para toda la población rural, especialmente para los pequeños y medianos agricultores. Esta creciente destrucción, con sus resultados conocidos, como erosión, sequías, inundaciones, menor producción agropecuaria, tiene su impacto económico y social inmediato más severo en la población de limitados recursos. La experiencia de los últimos años ha demostrado que tal manejo debe basarse en el análisis de factores ecológicos, sociales y económicos y debe beneficiar a corto y a largo plazo a la población rural.

Los desastres naturales ocurridos en zonas influidas por la actividad volcánica, unidos al mal uso de los recursos naturales, han conducido a agravar la crisis alimentaria mundial, con el natural impacto sobre los países menos desarrollados. Se estima que la demanda de alimentos de los países en desarrollo casi se duplicaría en el período comprendido entre 1970 y 1990. Por otra parte, estudios de organismos como el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), la Comisión Económica para América Latina (CEPAL) y el Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA), coinciden en señalar un número de habitantes en América Latina de unos 640 millones para el año 2000, a una tasa anual de 2.7%. Colombia, a una tasa de incremento de 2.2% anual, casi duplicará su población en 20 años. Se registra una tasa de aumento similar en Costa Rica, mientras que Honduras, México y la República Dominicana arrojan valores más altos (3.2% en promedio). Otros países sudamericanos como Argentina, Uruguay y Chile han permanecido protegidos de la explosión demográfica, con tasas de crecimiento de 1.3, 1.1 y 1.6%, respectivamente (World Population Bureau¹⁸).

Los anteriores planteamientos llevan a la conclusión de que los pueblos del llamado **tercer mundo** tienen que utilizar juiciosamente

sus recursos naturales renovables, si desean satisfacer sus necesidades energéticas y de alimento en el futuro, para lo cual la FAO³ estima una incorporación de 200 millones de hectáreas a la producción para fines del siglo.

La tenencia de la tierra como factor determinante del uso del suelo

El uso y la tenencia de la tierra en América Latina tiene sus raíces en la época de la conquista. La situación de tenencia de la tierra, en estos países, se ha caracterizado por el latifundio como sistema ineficaz e improductivo, y por el minifundio, que absorbe la fuerza del trabajo de la familia sin dejar margen para inversión o mejoras. Martínez⁷, en referencia al área de ocupación de la Selva Central del Perú, anota lo siguiente: "igual que en el pasado, la tierra continúa siendo el centro de una serie de creencias y problemas básicos que se suscitan en éste y otros lugares de la Selva Alta Peruana. Las empobrecidas masas andinas, bajo el espejismo de su gran fertilidad, fundado en la engañosa y lujuriente vegetación, ven en estos ecosistemas la esperanza de solución a las contingencias de su diaria existencia, a saber: escasez del recurso a medida que se expande la familia o se agotan los suelos, ausencia de fuentes de trabajo ajenas a las actividades agropecuarias, insuficiencia de ingresos para solventar las necesidades tradicionales y aquéllas que emergen de su inserción cada vez más profunda en una economía de consumo, y la necesidad de asegurar el porvenir de los hijos". Este cuadro es similar para muchos miles de hectáreas de la tierra baja húmeda tropical y aun de las laderas andinas del trópico americano. Se sabe que el acceso a la tierra productiva y en extensiones suficientes no es fácil. Los mejores suelos, como los aluviales, se hallan ocupados ya desde mucho tiempo atrás, quedando los nuevos colonos ante la expectativa de cultivar terrenos improductivos con problemas de baja fertilidad, difícil acceso, pendientes extremas y otras dificultades.

Las comunidades indígenas, a su vez, han sido relegadas cada vez más y sus tierras de cultivo, a menudo enclavadas en reservas forestales, se hacen cada día menores. Se da el caso aun en que los indígenas están desbrozando grandes extensiones boscosas para implantación de pastizales, con el ánimo de levantar algún ganado. Esta situación es comentada por Martínez⁷, respecto de la actividad de los indios amueshas del valle del río Palcazu, Selva Central del Perú. La situación de minifundio improductivo y latifundio subutilizado, no ha mejorado en América Latina en los últimos 20 años, a pesar de

los esfuerzos de los gobiernos por llevar reformas agrarias, las más de las veces inoperantes, debido a que propiciaron un mayor fraccionamiento de la propiedad. En Colombia, por ejemplo, las propiedades mayores de 500 hectáreas cubren el 40% de la tierra agrícola disponible y pertenecen sólo al 0.6% de los propietarios, mientras que —en contraste— las fincas inferiores a 10 hectáreas corresponden solamente al 9% del área total, pero son poseídas por aproximadamente el 76% de los propietarios.

Esta distribución irregular de las tierras es similar en casi todos los países de la América Tropical. En efecto, para la Selva Central del Perú, Martínez⁷ informa que el 37% de las unidades agropecuarias inferiores a 10 hectáreas correspondían a una superficie de 51 000 hectáreas (de un total de 468 000 hectáreas), mientras que, por ejemplo, propiedades entre 100 y 200 hectáreas correspondían a un 27%, equivalente a 125 500 hectáreas. El 20% representa fincas de más de 500 hectáreas, con una superficie equivalente de 93 500 hectáreas.

La situación descrita no tiende a cambiar en un futuro cercano, debido en parte a las estructuras agrarias de los países latinoamericanos. Por otra parte, los organismos públicos o privados que enseñen prácticas de manejo adecuadas, como rotación de terrenos, rotación de cultivos, técnicas agrosilvopastoriles, uso de abonos orgánicos y otros, son escasos o inexistentes en las zonas críticas que hemos referido.

La asignación de tierras para el bienestar común ha causado y seguirá causando conflictos políticos en los países en desarrollo, sobre todo porque es necesario cambiar la actitud individualista por un criterio de posesión comunitaria de la tierra. En los países tropicales, con una alta tasa de incremento de la población y una tremenda presión sobre la tierra, el dilema de **tener y no tener** se ha vuelto un conflicto casi insoluble por parte de los gobiernos. Las reformas agrarias latinoamericanas, concebidas en la conferencia de Punta del Este en 1961 por los estadistas de América Latina, sólo han aportado pequeños o ningún progreso hacia la transformación de sus estructuras socioeconómicas, cuando en aquella época prometieron hacer vigorosas reformas, bajo el lema de "la tierra es para quien la trabaja". En otros casos, las reformas agrarias únicamente se han limitado a repartir tierras de minifundio a los pequeños aparceros, contribuyendo así al fraccionamiento de la propiedad. La productividad de los terrenos, cada vez más fraccionados, bajó por consiguiente a niveles mínimos, con lo cual las reformas agrarias se convirtieron en una utopía. La situación de poblaciones desilusionadas frente a unos pocos satisfe-

chos y privilegiados, se torna cada vez más explosiva; y el perfeccionamiento y ampliación de las comunicaciones permite a las clases bajas tomar conciencia de su injusta situación. No es el propósito de este capítulo discutir la validez política de los planteamientos anteriores, por lo que esbozaremos algunas pautas orientadas hacia un mejor uso de la tierra tropical.

EL USO DE LA TIERRA EN AMERICA LATINA

El uso actual de la tierra

El uso del suelo (producción agraria) en América Latina se concentra sólo en una pequeña extensión de su territorio. Grandes superficies permanecen aún bajo vegetación natural o son difícilmente accesibles. Como se mencionó, el uso agrícola y pecuario del suelo se extiende hoy a expensas del bosque nativo aún restante, lo cual está ocasionando un gran desequilibrio en el ecosistema.

Según datos de la FAO/UNESCO⁵, dos mil millones de hectáreas se reparten como sigue:

- 21.2% Ciudades, valles, lagos, ríos y tierras de nieves perpetuas.
- 5.8% (120 millones ha), tierra arable, bosques y rastrojos, así como pastizales.
- 24.3% Ganadería extensiva.
- 47.7% (961 millones ha) vegetación natural. De esta cifra unos 300 millones de hectáreas son susceptibles de explotación y manejo, entre las cuales aproximadamente 20 millones con bosques de coníferas y 90 millones con bosques de maderas duras.

En un nivel continental, la proporción de tierra arable, boscosa y en rastrojo, respecto de la superficie total, es en Latinoamérica de 5.8%. Esta cifra es menor que en Africa (8.5%) y el Cercano Oriente (7.3%) (Fassbender⁶).

La relación del área cultivada *per cápita* puede considerarse como un índice de la intensidad del uso del suelo. Mientras que en la región asiática una densidad de 0.18 ha/cápita muestra una escasez de tierra, en Africa (0.62 ha/cápita) y América Latina (0.43 ha/cápita) se dispone de mayor extensión. Estos promedios, sin embargo,

deben tomarse con reservas, si se tiene en cuenta que al menos en América Latina los países interandinos tienen concentrado el uso del suelo en las cordilleras (Fassbender⁶).

La distribución de la tierra no cultivada y de la superficie en ganadería y bosques es muy variable en América Latina. Los países interandinos poseen grandes reservas forestales, mientras que la Argentina y el Uruguay acusan extensas zonas ganaderas. En Centroamérica se registran altos porcentajes de superficies dedicadas a la agricultura.

El área total estimada, deforestada anualmente, de bosques naturales latifoliados del trópico húmedo americano supera los 3 millones de hectáreas. La proporción entre deforestación y reforestación es de 30:1 en promedio (FAO⁴).

La concentración de la población corre paralela con la intensidad del uso agrícola del suelo en Sudamérica. La utilización más intensiva y más rentable abarca toda la costa atlántica, desde el noreste brasileño (caña de azúcar); Bahía y Espíritu Santo (cacao); Río, Sao Paulo (café), Paraguay (cereales y bosques) hasta Río Grande do Sul, Uruguay y La Plata (cereales, ganadería); los valles interandinos de Colombia, Perú y Ecuador (cereales, caña de azúcar, papa, café) y la Costa Pacífica Norte (maderas, algodón, banano, cacao).

El uso potencial de la tierra

El uso potencial se basa en la aptitud del suelo, las características ecológicas del sitio y las condiciones socioeconómicas de la zona objeto de estudio. El Cuadro 81 relaciona los suelos potencialmente laborables en América Tropical.

Del Cuadro 81 se deduce, sin lugar a dudas, que existen disponibles más de 600 millones de hectáreas de suelos bien drenados, con pendientes menores de 30%, que tal vez representen un inmenso potencial para producción de cultivos, plantaciones forestales, pastos y agroforestal. Las propiedades edáficas y las características socioeconómicas de estas tierras deben ser estudiadas en detalle, antes de formular proyectos de desarrollo.

Justificación ecológica de los patrones actuales de uso de la tierra en el trópico húmedo

Los patrones de uso actual de la tierra en el trópico húmedo americano son un reflejo de las limitaciones ecológicas del suelo y del

CUADRO 81: Distribución de los suelos potencialmente a/ utilizables en la región central de América Tropical.

Región Climática b/	Topografía (pendiente %b)					
	Plano pobremente drenado	Bien drenado				%b
		0-8	8-30	30	Total	
		----- millones de hectáreas -----				
Bosque lluvioso tropical c/ (> 300 mm. + 9 meses húm. > 23.5°C)	65	128	20	4	217	27
Bosque estacional semi-siempre verde (1060-1300 mm 8-9 meses húm. > 23.5°C)	50	189	64	5	308	38
Sabanas Isohipertérmicas (900-1060 mm. 6-8 meses húm. > 23.5°C)	31	76	13	9	129	16
Sabanas Isotérmicas (idem anterior)	0	33	6	4	43	5
Bosque estacional deciduo (< 900 mm. -7 meses húm. > 23.5°C)	23	62	10	8	103	12
Bosques subtropicales (sin definición)	1	9	1	0	11	1
Otros tipos de bosque (sin definición)	0	0	2	6	8	1
Total	170	497	116	36	819	
%b	21	61	14			100

a/ debe entenderse en el sentido de mejorar su producción para pastos, cultivos o agroforestal, de acuerdo con sus propiedades edáficas y topográficas;

b/ clasificación climática según Hargraves, 1977 (citado por los autores);

c/ los parámetros climáticos deben entenderse (para todas las regiones) así:

mm = evaporación potencial total de la época húmeda

meses húmedos = aquéllos con un Índice de Humedad Disponible (MAI) > 0.33

$$MAI = \frac{\text{Precipitación}}{\text{Evap. transp. potencial}}$$

°C = Temperaturas mensuales medias de la época húmeda.

FUENTE: Cochrane, T. y Sánchez, F.L.², adaptado.

clima y también de las condiciones socioeconómicas de la región. Estas se reflejan también en el monto de capital disponible para inversiones y en la proximidad a los centros de mercado, incluyendo la dificultad del transporte. A esta lista de limitaciones se suman las tradiciones y patrones culturales existentes en la región, ya explicados anteriormente. Un caso típico es el de la Selva Central del Perú, en donde, por ejemplo, las especies maderables valiosas que están accesibles son objeto de actividades extractivas que ocasionan grandes claros, que luego son utilizados para producción ganadera. La agricultura migratoria es responsable, probablemente, del aclareo de más superficie que la misma actividad de aprovechamiento del bosque; sin embargo, pocos finqueros son capaces de alcanzar una producción

sostenida (de las Salas^{11, 12}; Pool⁸). Un caso extremo, en el cual la mayor limitación la constituye el clima, es la región del Bajo Calima, en el pacífico colombiano (7600 mm; 26°C). Bajo tales condiciones naturales, los nativos aprovechan únicamente la faja de los diques aluviales, en la cual siembran cultivos de subsistencia como caña, yuca, papachina, plátano y algunos frutales. En los rastrojos secundarios, después de tumbado el monte, siembran el llamado **maíz chococito**, el cual es único en este tipo de ecosistemas. En el paisaje no aluvial, es decir, el de colinas bajas, se practica el **madereo**. Otros límites relevantes para la explicación del uso actual del suelo, en el trópico húmedo, son las épocas de sequía, que dificultan el mantenimiento de los pastos; los bajos niveles de fertilidad del suelo; las pendientes empinadas que hacen difícil escoger las cosechas más rentables; los problemas de control de plagas y enfermedades y la constante presión sobre nuevas tierras. Este último es uno de los causantes de la degradación de los suelos y lo que hace peligrar la capacidad de carga de los sistemas naturales, al tiempo que propicia la inestabilidad de la población rural y el uso ineficiente del bosque y de los recursos del suelo.

Errores que cuestan

La falta de identificación de tecnologías de producción, adaptadas a las condiciones socioeconómicas y al ambiente biofísico del habitante rural, ha hecho cometer no pocos errores a los que toman decisiones en el uso de la tierra. Desafortunadamente, dichos errores cuestan no solamente mucho dinero, sino un tiempo difícil de recuperar y, sobre todo, generan la desconfianza de los usuarios hacia las actitudes de los gobiernos. Al ilustrar este planteamiento, citaré sólo dos ejemplos, tomados de dos regiones colombianas:

Primer caso: En la región selvática húmeda del Caquetá, Colombia, un proyecto de colonización, con el fin de aumentar la producción ganadera de la zona y disminuir la tasa de deforestación, fracasó en su intento de protección al bosque y en las perspectivas de desarrollo ganadero. La decisión de los agricultores fue proteger solamente 5% del bosque, con el objeto de satisfacer sus necesidades básicas de leña y otros productos. Por su parte, el Banco Mundial, financiador del Proyecto, llegó a la conclusión, en la segunda fase del mismo, de que aunque no se percibió un aumento en el nivel de ingresos de los beneficiarios, la posesión de un hato de ganado les había permitido quedarse en sus predios (85 hectáreas en promedio), en lugar de seguir

dependiendo de los cultivos migratorios. La conclusión general fue del siguiente tenor: "con la importación del 60% del ganado bovino de cría, el Proyecto consiguió mejorar notablemente las perspectivas de desarrollo de una zona llamada a desempeñar un importante papel en los esfuerzos del Gobierno por fomentar la producción ganadera". Este es un buen ejemplo para considerar algunos aspectos:

1. no se identificaron los conflictos entre los sectores ganadero y forestal o su resolución tuvo graves fallas;
2. un gran porcentaje de las 4500 familias proyectadas para el programa de colonización, no tenía experiencia en ganadería;
3. se implantó la ganadería en suelos hidromórficos con serias limitaciones de uso por drenaje impedido.

Segundo caso: En el Departamento de Córdoba, Colombia, se decidió construir dos embalses con el fin de aprovechar, para riego y generación de energía eléctrica, las aguas del río Sinú. Estos embalses tendrán una capacidad de almacenamiento de 15 000 millones de metros cúbicos, distribuidos en dos centrales: Urrá I y Urrá II. La primera central generará 340 000 Kw y la segunda central generará aproximadamente 700 000 Kw. El costo total de las obras está calculado en 430 millones de dólares. El área de inundación se calculó en más de 57 000 hectáreas, que albergan nueve millones de metros cúbicos de madera. Se hizo un estudio de las alternativas de la extracción y la utilización de las maderas de ambos embalses, con la advertencia de que todo este volumen debía extraerse por lo menos con dos o tres años de anticipación a la inundación. Sin embargo, por razones no bien aclaradas, esta biomasa no fue aprovechada, con el consecuente riesgo de su inundación *in situ*. Un estudio de impacto ambiental, contratado por el gobierno con una firma extranjera, identificó por lo menos 59 efectos negativos del proyecto y fijó recomendaciones para mitigar dichos efectos, pero hasta la fecha dicho estudio no ha tenido aplicación. El concepto de algunos ecólogos es el de que los perjuicios de inundar 57 000 hectáreas, la mayoría de suelos aluviales fértiles para la agricultura, son muy inferiores a los perjuicios que se causarán con la construcción del segundo embalse (Urrá II). Por otro lado, las pérdidas de la no extracción de las maderas, no solamente por su falta de aprovechamiento sino por los gastos adicionales de mantenimiento del embalse cuando se descomponga la materia orgánica, llegan a cifras astronómicas. Este es un caso de toma de decisiones, en el cual los intereses políticos priman sobre los intereses ecológicos.

Algunas pautas

Las siguientes orientaciones pretenden orientar a los que toman decisiones y a los planificadores del uso de la tierra, sobre las opciones más relevantes que tienen que ver con el uso de los recursos naturales renovables. Algunas de estas se exponen a continuación.

1. El planificador necesita orientaciones sobre métodos sencillos y practicables de manejo silvicultural, que aseguren la reposición del recurso a la vez que concilien los intereses de la población local.
2. Se necesita informar a los que toman decisiones sobre recursos en el trópico, acerca de las nuevas opciones sobre el futuro uso de la tierra deforestada; una de esas opciones es la agrosilvicultura (ver Cap. 12).
3. Los organismos planificadores de recursos de bosques deben impulsar investigaciones sobre sistemas de aprovechamiento del bosque húmedo tropical, más acordes con las características socioeconómicas de las poblaciones que viven del bosque.
4. La planificación del establecimiento y desarrollo de actividades forestales agrícolas y pecuarias debe enmarcarse dentro de criterios ecológicos, principalmente (Ruiz⁹).

La ubicación de Zonas de Vida, aptitudes de uso de la tierra y la ubicación de las actividades productivas y de conservación, deben conformar los primeros pasos en el proceso de determinación de las tierras, en donde las actividades mencionadas pueden impulsarse y hasta qué grado. El Perú, por ejemplo, cuenta ya con un reglamento de clasificación de tierras, basado en criterios ecológicos (Tosi¹⁶). La base de estas clasificaciones consiste en reducir al máximo los conflictos que puedan surgir entre los diferentes usos de la tierra. Por ejemplo, la ganadería no debería ser una opción del uso de la tierra en suelos mal drenados, fuertemente lixiviados o superficiales, con precipitación pluvial por encima de 3000 mm y laderas con pendientes mayores de 30%, susceptibles a la erosión hídrica.

En estas regiones, una mejor opción de desarrollo sería el manejo del bosque natural o el cultivo de plantaciones forestales. En casos extremos, podría practicarse la ganade-

ría, en combinación con bosques, dentro de sistemas silvo-pastoriles*. Ruiz⁹ sugiere algunos factores para la identificación de tierras aptas para la ganadería, en el trópico americano. Estos factores están resumidos en el Cuadro 82.

CUADRO 82: Factores sugeridos para la identificación de tierras aptas para la ganadería.

Pendiente %	Tipos de suelos	Profundidad	Drenaje a/	pH mínimo	Peligro de anegamiento b/
0 - 8	Entisol, Inceptisoles Ultisoles	Superficial	Excepto D y E	4.0	Hasta 2
0 - 15	Inceptisoles, Alfisoles, Ultisoles	Mediana	Excepto D	4.0	----
15 - 30	Inceptisoles, Alfisoles	Profundo	Excepto D	4.0	----

a/ Según Tosi¹⁶, D corresponde a drenaje muy lento y E a terreno anegado

b/ 2 corresponde a inundación moderada (Tosi¹⁶).

1/ Los anteriores parámetros agroclimáticos fueron consultados y aceptados por los especialistas respectivos en un estudio de caso de manejo ambiental en la Selva Central del Perú (ver literatura citada: Ruiz⁹; Pool⁸; de las Salas¹²).

FUENTE: Ruiz⁹.

5. Deben realizarse esfuerzos para aumentar el nivel de fertilidad de los suelos, especialmente ácidos, de tal manera que el aumento de la productividad de los cultivos y su nivel de sostenimiento, a largo plazo, compense el costo de los tratamientos de fertilización**. Un rendimiento sostenido de cultivos podría también abrir la posibilidad de utilizar diversos cultivos o nuevas plantas de valor económico, especialmente aquéllas descuidadas por mucho tiempo, tales como frutos nativos, palmas y otros (Pool⁸).
6. El desarrollo futuro de los trópicos húmedos debe analizarse a partir de las fallas y los éxitos de los proyectos de asentamientos humanos del pasado. Los principios ecológicos deberían aplicarse a la agricultura tropical y, en general, al uso del suelo, incorporando los conocimientos empíricos existentes en la región de estudio (ver, por ejemplo, UICN¹⁷).

* Los anteriores parámetros agroclimáticos fueron consultados y aceptados por los especialistas respectivos en un estudio de caso de manejo ambiental en la Selva Central del Perú (ver literatura citada: Ruiz⁹; Pool⁸; Salas, De las¹²).

** Se recomienda al lector interesado consultar el libro **Suelos Ácidos; estrategias para su manejo con bajos insumos** en América Tropical. Sánchez, Pedro y Salinas, José¹³.

Perspectivas

En esta última parte del capítulo, quisiera comentar dos enfoques acerca de las perspectivas del uso del suelo y de la toma de decisiones en el trópico húmedo americano. El primer enfoque es el que denomino **los arúspices del desastre**; y el segundo, es compartido por los optimistas.

Los arúspices del desastre

En los últimos 10 años, se ha venido formando un grupo de ecólogos y planificadores de recursos que, si bien con buenas intenciones, han alarmado a la humanidad sobre los problemas mundiales que sobrevendrán para el año 2000. Existen no pocos informes, estudios y aún libros que hablan sobre todas las calamidades que sobrevendrán, si no se hace un juicioso uso de los recursos de la tierra.

En el informe-resumen, ampliamente conocido por muchos titulado **El Mundo en el año 2000** (Barmey¹), se lee por ejemplo: "las tensiones demográficas, ambientales y las que repercuten sobre los recursos naturales se intensificarán y determinarán cada vez más la calidad de vida humana en nuestro planeta. Esas tensiones ya son suficientemente extensas para denegar a muchos millones de personas la satisfacción de necesidades básicas, como alimento, casa, salud y empleo, así como la esperanza de alcanzar alguna mejoría. Al mismo tiempo, la capacidad de sustentación del planeta —la aptitud de los sistemas biológicos para proporcionar recursos que satisfagan las necesidades humanas— se deteriora. Las tendencias que el presente estudio refleja, sugieren reiteradamente un proceso progresivo de degradación y empobrecimiento de los recursos naturales de la tierra". El profesor Lawrence Roche, de la Universidad de Bangor, Gran Bretaña, comentando el artículo escrito por Norman Myers, **Necesidades de conservación y oportunidades en los bosques húmedos tropicales**, en el cual establece que entre 200 000 y 250 000 kilómetros cuadrados de bosques húmedos primarios tropicales están sufriendo de desajuste significativo y en algunos bosques la eliminación es permanente cada año, refuta esta afirmación, diciendo: en teoría, esto significa que toda la biomasa de aproximadamente nueve millones de kilómetros cuadrados desaparecerá en sólo 37 años. Esta estadística y sus implicaciones son dignas de revisión. Continúa el profesor Roche diciendo que otros artículos publicados por el mismo autor, en años recientes, admiten la debilidad de los datos utilizados para obtener pro-

yecciones mundiales. Sin embargo, estas proyecciones se toman cada vez más, como un dato definitivo. Actualmente uno lee frecuentemente, comenta Roche, declaraciones de que muchas hectáreas de los bosques húmedos tropicales son anualmente "perturbados", "convertidos", "siendo eliminados", irreparablemente dañados por cambios de cultivos o en trámite de desaparición. A esta lista, debe agregarse uno de los clichés más simplistas, engañosos y dañinos, pero frecuentemente utilizados: *El bosque tropical, un recurso no renovable*, de Gómez-Pompa *et al* (Science, N° 177). Esta publicación la citan en muchas declaraciones y en muchos estudios como un dato fidedigno. El lector puede formarse un juicio sobre este tema en Scorer¹⁴.

La preocupación por el deterioro de los recursos se exterioriza internacionalmente en las conferencias magistrales, convocadas por las Naciones Unidas y por otros organismos en el último decenio: Estocolmo, 1972; Población, 1974; Alimentos, 1974; Agua, 1977; Desertificación, 1977; Tecnología para el desarrollo, 1979; Fuentes alternas de energía nuevas y renovables, Nairobi, 1981; Bogotá, 1982 y otras más. Frente a estas perspectivas es saludable mirar también la otra cara de la medalla.

Tendencias optimistas

Las acciones concretas que están tomando muchos países en desarrollo del trópico americano, en particular, obligan a pensar en una dirección optimista. En efecto, ya se están adoptando nuevos métodos de utilización de la tierra.

Entre ellos, cabe mencionar: a) reforestación en suelos marginales, por ejemplo, las 100 000 hectáreas de pino caribe en las llanuras degradadas del Uvarito, Estado Moñagas, Venezuela, y las inmensas plantaciones de eucaliptos de la zona del Estado Central de Minas Gerais, Brasil, como dos ejemplos relevantes en este aspecto); b) la recuperación de zonas desérticas que antes se habían perdido para la producción de alimentos (más de 3000 hectáreas plantadas de *Prosopis tamarugo*, para alimentación de ganado en Chile y Perú, miles de hectáreas plantadas con jojoba en las zonas muy secas de Centroamérica, Estados Unidos y México); c) recuperación de suelos marginales con especies de rápido crecimiento, usos múltiples, forrajeras, nitrificantes y dadoras de otros bienes y servicios (*Leucaena* y otras reseñadas en el Cap. 11); d) proyectos de utilización de fuentes nuevas de energía no convencional, como la leña (el caso más reciente es

el proyecto CATIE/ROCAP, el cual desarrolla este campo en Centroamérica desde hace aproximadamente cinco años); e) desarrollo de sistemas agrosilvopastoriles; f) aumento de la productividad de suelos infértiles (el caso más conocido en América Tropical es el de Yuriaguas, Perú. Aquí, las nuevas investigaciones incluyen cultivos agrícolos, reservas boscosas, manejo de pastos y suelos dentro de un modelo que debe evitar los efectos potencialmente indeseables de grandes superficies taladas: Dr. P.A. Sánchez, comunicación personal). Otro caso digno de citar es el mejoramiento de suelos ácidos e infértiles de los Llanos Orientales colombianos; el CIAT lleva a cabo un programa de productividad de pastos y forrajes bajo estas condiciones extremas, con resultados halagadores. Deben mencionarse también los programas encaminados a conservar el patrimonio genético de las especies en peligro de extinción en los trópicos húmedos (para Latinoamérica se debe destacar el programa IICA-Trópicos, Belem, Brasil).

Sería largo, y además fuera de los propósitos de este capítulo, enumerar todas y cada una de las agencias y organismos internacionales y regionales dedicados a impulsar proyectos de desarrollo y manejo de los recursos naturales y del suelo en toda la América Tropical. Los esfuerzos conjuntos de los países y de las instituciones donantes, sólo serán compensados con actitudes optimistas. Si estos esfuerzos valieron la pena, el tiempo lo dirá.

RESUMEN

1. Se define el problema del uso del suelo en América Latina con base en las siguientes estimaciones:
 - la producción agraria en América Latina ha aumentado a un ritmo anual promedio del tres por ciento en los últimos 25 años;
 - la crisis del petróleo ha sacudido la economía agraria de los países no productores o no exportadores de este recurso;
 - el alto costo de los insumos agrícolas no permite el uso rentable del suelo en regiones de alta presión sobre la tierra, con estructura de minifundio;
 - más de dos y medio millones de hectáreas de bosques naturales se destruyen anualmente para practicar agricultura de subsistencia y ganadería extensiva;

- el número de habitantes de América Latina, para el año 2000, se estima en 640 millones, que demandan la incorporación de 200 millones de hectáreas a la producción agropecuaria.
- 2. Se destaca la tenencia de la tierra (minifundio improductivo y latifundio ocioso) como factor determinante del aprovechamiento inadecuado del suelo. Se pone de relieve el fracaso de las reformas agrarias en América Latina.
- 3. Se compara el uso actual y potencial de la tierra en América Latina, destacando la existencia de más de 600 millones de hectáreas de suelos planos bien drenados (sólo en América Tropical) que podrían aprovecharse para cultivos, plantaciones forestales, pastos y sistemas mixtos agroforestales.
- 4. Se justifica el patrón de uso actual de la tierra en el trópico húmedo americano, poniendo de relieve las siguientes limitaciones:
 - 1. biofísicas: altas precipitaciones, sequías estacionales, infertilidad de suelos;
 - 2. infraestructurales: servicios de extensión ineficientes, condiciones de mercado deficientes, inexistencia o falta de caminos;
 - 3. humanas: falta de recursos humanos;
 - 4. económicas: carencia de inversiones.
- 5. Se ilustran dos casos, en los cuales los intereses ecológicos fueron relegados a un segundo plano, en la instrumentación de proyectos de desarrollo.
- 6. Se sugieren pautas para la planificación de las actividades relacionadas con el uso de la tierra en la América Tropical.
- 7. Se hace un breve análisis de las perspectivas pesimistas y optimistas del uso del suelo y del aprovechamiento de los recursos naturales renovables.

BIBLIOGRAFIA

1. BARMEY, G.O. s.f. El mundo en el año 2000, informe al Presidente (EUA) V. 1 50 p.
2. COCHRANE, T.; SANCHEZ, F.L. 1981. Estudios del uso potencial de la tierra para la evaluación y transferencia de agrotecnología basada en germoplasma: un informe intermedio. In Suelos Ecuatoriales (Colombia). 11(1): 29 p. y anexos. Memorias del seminario internacional sobre clasificación del uso potencial de la tierra en el trópico latinoamericano. Medellín, octubre 1980.
3. FAO. 1978. Agriculture toward the year 2000. Roma.
4. FAO. 1982. Los recursos forestales tropicales. Estudio de Montes No. 30. Roma, 113 p.
5. FAO/UNESCO. 1968. Definitions of soil units for the soil map of the world. Rome. World Soil Resources Report 33.
6. FASSBENDER, H.W. 1972. Chemisches Verhalten der hauptnährstoffe in böden der tropen, insbesondere in Lateinamerika. In Göttingen bodenkundliche Berichte 23:1-182.
7. MARTINEZ, A. 1982. Aspectos históricos y actuales del proceso de ocupación de la Selva Central del Perú y algunas observaciones para la planificación ambiental. OEA/PNUMA/ONERN. Estudio de caso de manejo ambiental: desarrollo integrado de un área en los trópicos húmedos; la Selva Central del Perú. Lima, Perú. 68 p. (mimeo).
8. POOL, D.J. 1982. Guidelines for planning the development of the humid tropics. OAS/PNUMA/ONERN. Report on the agricultural sector. Lima, 56 p. (mimeo), no publicado.

*Este libro se terminó de imprimir
en las talleres Gráficos de
Litografía e Imprenta
VARITEC, S.A. San José, Costa Rica
en el mes de diciembre de 1987
Tirada 2 200 ejemplares.*

SUELOS Y ECOSISTEMAS FORESTALES con énfasis en América Tropical, ha sido concebido como un texto de enseñanza y consulta en las escuelas técnicas y facultades de ciencias forestales, agronomía, geografía, ciencias biológicas y campos afines. Es útil igualmente para aquellas personas interesadas en la conservación y el desarrollo sostenido de los recursos naturales renovables. Identifica el suelo como componente del ecosistema forestal y analiza su importancia en el manejo de las plantaciones forestales. Describe el suelo forestal como centro de actividad biológica y almacén de nutrimentos, a la vez que evalúa la influencia de la cobertura forestal sobre el régimen hídrico de las cuencas hidrográficas. Dedicó espacio al uso del suelo bajo agricultura migratoria, ganadería y sistemas forestales. Constituyen una valiosa orientación para quienes toman decisiones sobre el manejo de los recursos naturales, destacando este aspecto en el Capítulo 15. Hace énfasis en un ámbito geográfico que contiene uno de los ecosistemas más frágiles del mundo: el Trópico Húmedo Americano.

GONZALO DE LAS SALAS (COLOMBIA). Doctor en Ciencias Forestales por la Universidad de Göttingen, Alemania Federal. Ingeniero Forestal de la Universidad Distrital "FJC" (Bogotá).

Ha ejercido cargos docentes en la Universidad Distrital "FJC", Universidad Jorge Tadeo Lozano (Colombia) y en el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en Costa Rica.

En 1984 le fue concedido el **Premio Nacional de Investigación** de la Fundación para la Educación Superior. Su actividad profesional, a lo largo de dos décadas, la ha ejercido en diversos países latinoamericanos y de Europa en silvicultura, agrosilvicultura, suelos y manejo de cuencas hidrográficas. Ha publicado en revistas especializadas nacionales y extranjeras, tales como: **TURRIALBA, OECOLOGIA PLANTARUM, ACTA CIENTIFICA VENEZOLANA Y REVISTA FORESTAL LATINOAMERICANA**, entre otras. En la actualidad se desempeña como consultor e investigador en el campo de los Recursos Naturales Renovables. El Dr. De las Salas es miembro de la Sociedad Colombiana de Ecología, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, "International Society of Tropical Foresters" y "The British Ecological Society" (Inglaterra).

